Aus der Klinik für Hals-, Nasen- und Ohrenkrankheiten
der Universität Tübingen
Direktor: Professor Dr. D. Plester

Der Einfluß von Nulldurchgangsverzerrungen auf das Sprachverständnis bei Normalhörenden

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der Medizinischen Fakultät
(Klinische Medizin)
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
HORST RAICHLE
aus Reutlingen

1984

Aus der Klinik für Hals-, Nasen- und Ohrenkrankheiten
der Universität Tübingen
Direktor: Professor Dr. D. Plester

Der Einfluß von Nulldurchgangsverzerrungen auf das Sprachverständnis bei Normalhörenden

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der Medizinischen Fakultät
(Klinische Medizin)
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
HORST RAICHLE
aus Reutlingen

1984

Dekan:	Professor Dr. D. Plester
1. Berichterstatter:	Professor Dr. H. Breuninger
2. Berichterstatter:	Privatdozent Dr. M. Strohm

Druck: Zeeb-Druck, Tübingen 7 (Hagelloch)

Meinen Eltern
in
Dankbarkeit gewidmet

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

		Seite
A	EINLEITUNG	
	1. Bedeutung der Sprachaudiometrie	1
	1.1. Geschichtliche Entwicklung der Sprachaudiometrie	1
	1.2. Phonetische Grundlagen der Sprachaudiometrie	2
	1.3. Sprachanalyse	3
	2. Sprachaudiometrie	4
	3. Physiologie des Innenohres	5
	4. Hypothese Tonndorfs	6
B	METHODIK	8
	1. Verzerrung	8
	2. Probanden	8
	3. Versuchsaufbau und Durchführung	9
	4. Programm zur Durchführung der Untersuchungen	11
	5. Freiburger Wörtertest	12
	6. Apparatur und Ermittlung der Meßwerte	13
C	ERGEBNISSE	14
	1. Verständlichkeit der Wörter in Abhängigkeit von der Lautstärke und von der Verzerrung	15
	2. Verständlichkeit der Laute in Abhängigkeit von der Lautstärke und von der Verzerrung	19
	3. Statistische Auswertung	23
	4. Betrachtung und Auswertung der einzelnen Laute	24
	4.1. Aufschlüsselung der Wörter in Laute	24
	4.2. Beschreibung der Laute	25
	4.3. Quantitative Darstellung der Unverständlichkeit einzelner Laute	27
	4.4. Reihenfolge der Laute schlecht verstanden bis gut verstanden nach der Lautstärke, nach dem Rhyme Test und nach der Verzerrung	30
	4.5. Differenzierte Betrachtung der Verständlichkeit einzelner Laute im Wort	31

Seite

4.6. 3-dimensionales Sonagramm 34
4.7. Pegelaufzeichnung des Wortes "Furcht" 36
4.8. Pegelaufzeichnung der Wörter 1 - 10 der Gruppe 2 des Freiburger Wörtertests 38

D DISKUSSION 43
1. Phonetische Aspekte der Nulldurchgangsverzerrung 43
2. Psychoakustische Aspekte 46
3. Psychologische Aspekte 47
4. Neurophysiologische Aspekte 48
5. Elektrophysiologische Aspekte 50
6. Funktion des Innenohrs, Nulldurchgangsverzerrung und Tonndorfs Hypothese 50

E ZUSAMMENFASSUNG 53

F LITERATURVERZEICHNIS 54

LEBENSLAUF

A. EINLEITUNG

1. Bedeutung der Sprachaudiometrie

1.1. Geschichtliche Entwicklung der Sprachaudiometrie

Bezold(4) hält die Sprache für das vorzüglichste Mittel, um eine rasche allgemeine Orientierung über das im Einzelfall vorliegende Hörvermögen zu gewinnen.

Nachdem Helmholz(24a) 1862 seine Lehre von den Tonempfindungen aufgestellt und eine Lautanalyse für die Vokale bestimmt hatte, führte Wolf(85) 1871 auf demselben Wege eine Untersuchung der selbsttönenden Konsonanten durch, die dann später durch Hermann(24b) 1923, Köhler und Quinke(33a) 1923 weitergeführt wurde und durch Stumpf(64) 1926 ihre Vollendung erfuhr.

Spezielle Einzellautprüfungen stellten sich jedoch als zu einförmig heraus. Daher führte Wolf (85) 1871 erstmalig eine Auswahl Prüfungswörter auf, wobei er dem für das Wortverständnis entscheidenden Konsonanten einen größeren Prüfungswert zugestand. Mittels leiser Flüstersprache ermittelte er durch eine Reihe entsprechender Testwörter von hohen, Explosiv- und tiefen Lauten das Hörvermögen. Wolf(85) 1871 wählte mit Vorbedacht nur wenige Wörter, berücksichtigte dabei aber nicht, daß bei Wiederholungsprüfungen die Wörter ja auch im Gedächtnis des Patienten haften bleiben. Barany(3) 1910 arbeitete mit sinnvollen Wörtern, verließ aber den Gedanken von Wolf vom charakteristischen Wortbild und forderte akustische Gleichheit aller Laute bis auf den zu prüfenden Wechsellaut, dessen Hördistanz bestimmt werden sollte. Er stellte so 24 Gruppen mit je 4 - 19 Wörtern auf. Die phonetisch und akustisch nicht gleichen Wörtergruppen wurden 1923 von Lampert(34) überarbeitet und vervollkommnet. Als Grundlage dienten Ergebnisse der Analyse von Stumpf. Lampert(34) unterscheidet den zu prüfenden Wechsellaut einmal als Anlaut, zum anderen als Zulaut und letztlich als Auslaut, einmal in konsonantischen und einmal in vokalischen Reihen. Die Wechsellautmethode nach Lampert vereinigt die Vorzüge einer Gehörprüfung durch lebensvolle Wörter mit der Präzision einer reinen Lautprüfung. Während in Amerika im Laufe der Jahre 1942-1946

die Sprachaudiometrie auf ein hohes Niveau gebracht wurde, zeigten sich in Europa die ersten Ansätze erst in der Nachkriegszeit. Schubert(60) stellte 1952 einen sogenannten "Sprachprüftest für Schwerhörigengeräte" auf. Folgende Forderungen sollten dabei erfüllt werden:

1. Der Test muß die wichtigsten, in der deutschen Sprache vorkommenden Laute in derselben prozentualen Zusammensetzung zeigen, wie sie im Deutschen durchschnittlich auftreten.
2. Diese Forderung muß mit einem Minimum an Wörtern erzielt werden, um die Prüfdauer so kurz wie möglich zu halten.
3. Die Laute sollen nicht in sinnlosen Silben, sondern in den häufigsten vorkommenden Wörtern untergebracht sein, um möglichst wirklichkeitsgetreue, phonetische Verhältnisse zu erzielen und die Kombinationsgabe zu prüfen.
4. Die Anzahl der Laute in jeder Wortgruppe, die durch Pausen getrennt sind, sollen möglichst gleich sein.
5. Die Pause nach jeder Wortgruppe muß ausreichend lang sein, um dem Ohr Zeit zur Readaptation und Erholung von der Ermüdung zu geben.
6. Der Sprecher muß ein einwandfreies Hochdeutsch sprechen.

Nach Meister(43) 1954 sollte neben der Lauthäufigkeitsbetrachtung und der sehr notwendigen psychologischen Wortauswahl die phonetische Gleichwertigkeit einer Gruppe durch die beim normalen Ohr auftretende Belastung der Basilarmembran definiert werden.

1.2. Phonetische Grundlagen der Sprachaudiometrie

Das sogenannte Sprachfeld erstreckt sich vom tiefsten Grundton mit etwa 85 Hz bis zu den höchsten Formanten des s-Lautes mit 10000 - 12000 Hz. Der Stimmklang wird durch die von der Mundöffnung abgestrahlten Luftschwingungen gebildet. Es handelt sich dabei um Resonanzvorgänge bzw. nach Ranke(52) 1955 um ein "Mitschwingen". Man unterscheidet in der Sprache zwischen stimmhaften und stimmlosen Lauten. Die stimmhaften Sprachlaute werden durch Vibrationen der Stimmbänder geformt, die einen periodischen Luftstrom von Rechteckimpulsen in der Glottis zur Folge haben.

Ihre Schwingungen sind maßgebend für die Periode des Grundtones der Klänge. Diese Grundfrequenz bestimmt die Tonhöhe eines gesungenen oder gesprochenen stimmhaften Lautes. Der stimmhafte Laut besteht somit aus einer Stimmgrundlage und überdies aus verschiedenen harmonischen Obertönen.
Zur Gruppe der stimmhaften Laute gehören die Vokale und die Doppellaute sowie die stimmhaften Konsonanten oder Halbvokale. Die übrigen Konsonanten bilden die Gruppe der stimmlosen Laute. Sie haben Geräuschcharakter und werden im Ansatzrohr ohne Mitwirkung von Stimmbandschwingungen gebildet. Im Gegensatz zu den harmonisch verteilten Komponenten bei den Vokalen finden wir bei den Zischlauten außerdem eine dicht verteilte Folge von unharmonischen Komponenten, sogenannte kontinuierliche Spektren. Diese Spektren der Konsonantengeräusche z.B. beim /s/ werden durch Einengung des Luftraums zwischen Zunge und Frontzähnen gebildet. Der leisere /s/ besitzt Frequenzanteile bis 12000 Hz im Gegensatz zu dem lauteren /ʃ/, der etwa bis 6000 Hz reicht.

1.3. Sprachanalyse

Nach Fant(15) 1948 haben von männlichen Sprechern gesprochene Vokalspektren vier augenfällige Formanten. Die beiden niedrigsten liegen innerhalb des Frequenzbereichs von 200 Hz bis 850 Hz bzw. von 600 Hz bis 2500 Hz und bestimmen im wesentlichen die Eigenschaft eines Vokals. Der dritte Formant liegt in einem Bereich zwischen 1900 Hz - 3300 Hz und der vierte zwischen 3000 Hz und 4000 Hz. Die beiden niedrigsten Formanten werden als veränderlich angesehen, die vierten und höheren Formanten werden wegen ihrer verhältnismäßig kleinen Variation in der Sprache als feststehende Formanten bezeichnet, während der dritte Formant eine Zwischenstellung einnimmt. Daraus ergibt sich, daß nach entsprechender Übung auch der hochgradig Schwerhörige eine Unterscheidung der Vokale erlernen kann, wenn ihm nur Hörreste im unteren Frequenzbereich verblieben sind. Kainz(27) berichtet, daß z.B. die Wörter Fisch, Schiff, Zisch, Tisch, wisch, frisch, schwer erkennbar werden, wenn nur Schwingungen bis zu 3200 Hz übertragen werden. Die Wörter Hund, wund, Fund, Wind, rund, Ring, kund, bunt sind kaum voneinander zu unterscheiden, wenn die obere Übertragungs-

grenze bei 2200 Hz liegt. Folgender Vergleich demonstriert anschaulich die Bedeutung der hohen und tiefen Töne für die Sprachverständlichkeit. Wenn man eine Druckschrift mit einem Blatt Papier so verdeckt, daß die obere Hälfte nicht mehr zu sehen ist, ist die Schrift kaum lesbar. Verdeckt man dagegen den unteren Teil der Schriftzeile, so ist der Text z.T. zu lesen, z.T. erratbar, weil die langen Buchstaben noch sichtbar sind.

2. Sprachaudiometrie

Bei der Sprachaudiometrie werden beim Vorgang des Verstehens und Wiedergebens assoziative Zentren mitgereizt. Wir brauchen also eine genügend große Zahl von Reizserien, d.h. es müssen möglichst viele verschiedene Wörtergruppen zur Verfügung stehen. Jede Wörtergruppe muß jedoch an das Hörvermögen des Probanden die gleiche Anforderung stellen. Obwohl mit derselben Methode immer wieder andere Probanden geprüft werden, so müssen die bei verschiedenen Personen erzielten Ergebnisse untereinander und mit den Kurven Normalhörender vergleichbar sein. Hier dürfen jene in der Person des Probanden selbst liegende Faktoren nicht vergessen werden, die zwar bei keiner Prüfung auszuschalten sind, bei Untersuchung mit Sprache jedoch besondere Bedeutung verdienen. Es sind dies die individuellen Schwankungen von Interesse, Aufmerksamkeit, Gewissenhaftigkeit, Konzentration, augenblicklicher Laune, Temperament, Ermüdbarkeit etc. Gutzmann(21) stellte in seiner Arbeit über "Hören und Verstehen" fest, daß es viel weniger auf das Erkennen jedes einzelnen Lautes, als auf gutes und vernünftiges Kombinieren, schnelles Erfassen aller möglichen Kombinationen sowie prompt einsetzende eklektische Kombination ankommt. Mit anderen Worten: Wenn ein vorgesprochenes Wort richtig nachgesprochen wird, so ist damit noch nicht bewiesen, daß alle Laute , die das Wort zusammensetzen, auch richtig gehört wurden. Tatsächlich wird kaum die Hälfte der täglich gesprochenen Laute vom Zuhörer streng genommen gehört, während die andere Hälfte kombiniert wird. Gerade das Wortverständnis aber, das mehr ist als bloße Geräuschwahrnehmung, will die

Sprachaudiometrie messen, nur einsilbige Hauptwörter mit Sinn. Bei Egan(12) findet sich eine Bemerkung, daß die Verständlichkeit von Wörtern mit der Lautzahl zunimmt. Im Freiburger Wörtertest besteht eine Häufung der Konsonanten gegenüber den Vokalen, die in der Eigenart der gewählten einsilbigen Testwörter liegt. Die Einheitlichkeit der Wortart wurde streng eingehalten und nur allgemeinbekannte und gebräuchliche einsilbige Substantive gewählt. Schließlich können wir bemerken, daß bei jedem Prüfungswort der erste Laut von besonderer Bedeutung für das richtige Verstehen ist.

3. Physiologie des Innenohrs

Die einzelnen Schallfrequenzen werden an verschiedenen Orten der Kochlea gehört: hohe Frequenzen in der Nähe des ovalen Fensters, niedrige Frequenzen nahe dem Helikotrema. Nach der Wanderwellentheorie v. Békésy und Ranke(52) hat man sich die Abbildung gehörter Frequenzen in Form einer Wanderwelle folgendermaßen vorzustellen: Die Schwingungen der Membran am ovalen Fenster führen zu einer Volumenverschiebung der inkompressiblen Perilymphe, was wiederum eine Auslenkung der Membran am runden Fenster zur Folge hat. Wären die Reissnersche Membran und die Basilarmembran völlig starr, liefe diese Volumenverschiebung in der Scala vestibuli bis zum Helikotrema und entlang der Scala tympani zurück zum runden Fenster. Die Wände des Endolymphschlauches sind aber keineswegs starr, sondern geben der wellenförmigen Volumenverschiebung nach. Die Volumenverschiebung kann also "kurzgeschlossen" werden und erreicht so das runde Fenster, ohne über das Helikotrema laufen zu müssen. Das Nachgeben des Endolymphschlauches verläuft wellenförmig, d.h. die Reissnersche Membran und die Basilarmembran schwingen einmal gegen die Scala vestibuli, einmal gegen die Scala tympani. Dabei nimmt die Wellengeschwindigkeit und die Wellenlänge dieser Wanderwelle, die am ovalen Fenster beginnt, laufend ab. Eine der Ursachen dafür ist, daß die Basilarmembran in Richtung Helikotrema immer breiter wird und laufend an Steifheit verliert. Während die Wellenlänge der Wanderwelle also immer kürzer wird, wächst ihre Amplitude zu einem Maximum, um dann sehr schnell zu

verebben. Der Ort der maximalen Auslenkung des Endolymphschlauches liegt dabei um so näher beim Steigbügel, je kürzer die anfängliche Wellenlänge des Schalls, d.h. um so höher die Schallfrequenz war. In Form dieses Amplitudenmaximums ist damit jeder Schallfrequenz eine bestimmte Stelle des Endolymphschlauches zugeordnet. Die Verbiegung des Endolymphschlauches führt zu einer Verschiebung (Abscherung) der Tektorialmembran gegenüber den Haarzellen und damit zu einer Verbiegung der Haare dieser Hörsinneszellen, was schließlich die Auslösung von Aktionspotentialen in den zugehörigen Fasern des Hörnerves zur Folge hat. Dabei genügt wahrscheinlich schon eine Verbiegung der Sinneszellhaare um einige Billionstel eines Meters, also weniger als z.B. der Durchmesser eines Wasserstoffatoms mißt.

4. Die Hypothese Tonndorfs

In mehreren Veröffentlichungen(67,68,71,73) hat Tonndorf ein Konzept vorgeschlagen, welches die wesentlichen Phänomene der Innenohrschwerhörigkeit nämlich Hörverlust, Tinnitus, Recruitment und schlechtes Sprachverständnis erklären soll. Hierbei geht Tonndorf von der Vorstellung aus, daß durch Entkopplung der Deckmembran von den Stereozilien eine Art "totes Spiel" entsteht, welches für den Hörverlust verantwortlich ist. Erst bei höheren Auslenkungen kommt es zum Kontakt und damit zu einer Hörwahrnehmung. Gleichzeitig werden aber selbst bei höheren Amplituden die Nulldurchgänge nicht mehr korrekt übertragen, was zu sogenannten "Nulldurchgangsverzerrungen" führt.(Abb.1) Nach Licklider(38) wirken sich derartige Verzerrungen auf das Sprachverständnis wesentlich negativer aus, als selbst unendliche Amplitudenverzerrungen. Tonndorf vermutet daher, daß das teilweise sehr schlechte Sprachverständnis bei Innenohrschwerhörigkeit auf diesen Effekt zurückzuführen ist.
Derartige Verzerrungen lassen sich leicht simulieren. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Effekt dieser Art von Verzerrung auf das Sprachverständnis zu messen.

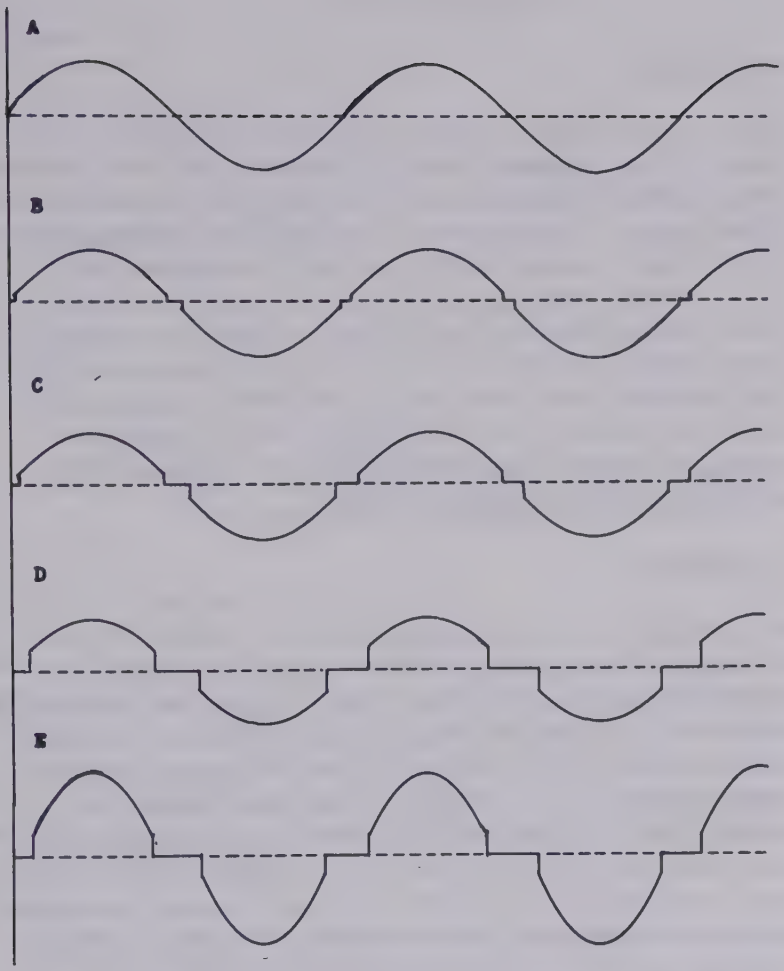


Abb. 1: Nulldurchgangsverzerrung

A normale Sinuswelle zum Vergleich

B 1/40 nulldurchgangsverzerrte Sinuswelle

C 1/20 nulldurchgangsverzerrte Sinuswelle

D 1/10 nulldurchgangsverzerrte Sinuswelle

E 1/10 nulldurchgangsverzerrte Sinuswelle, wobei die Lautstärke erhöht wurde

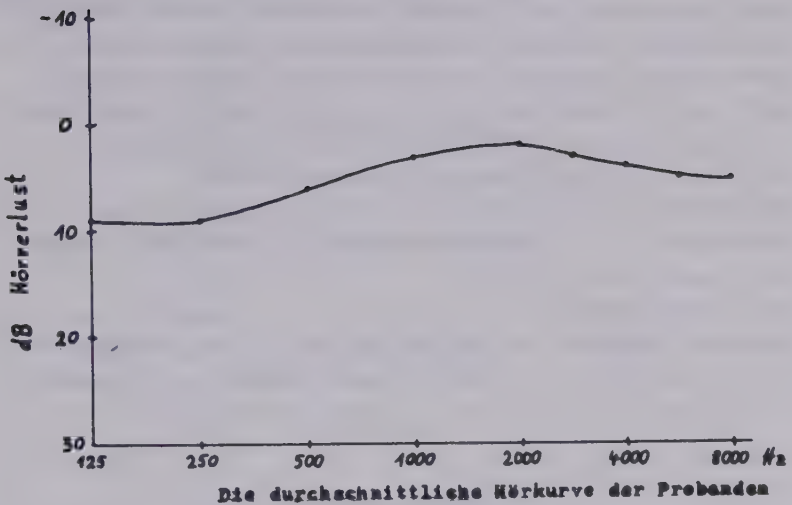
B. METHODIK

1. Verzerrung

Um bei normalhörenden Probanden eine Innenohrstörung zu simulieren, welche Tonndorfs Konzept entspricht, wurde der Freiburger Sprachtest entsprechend verzerrt. Es wurde ein Testband mit drei verschiedenen Verzerrungsgraden hergestellt. Die Verzerrungen selbst wurden realisiert mit Hilfe des Prozeßrechners Plurimat S. Jeweils ausgehend vom Amplitudenmaximum eines Wortes wurden alle Amplitudenwerte, die kleiner sind als ein Zehntel, ein Zwanzigstel oder ein Vierzigstel auf Null gesetzt.(Abb.1) Dies entspricht nicht ganz genau Tonndorfs Vorstellung. Der wesentliche Effekt, nämlich das Löschen der Nulldurchgänge kleinerer Amplituden, ist aber beibehalten. Wir meinen daher, daß beide Konzepte vergleichbar sind.

2. Probanden

Die Probanden sind junge Menschen im Alter zwischen 17 und 32 Jahren mit durchschnittlichem bis gehobenem Intelligenzgrad. Sie haben alle ein gutes Gehör, Ohrerkrankungen bei ihnen selbst sind ihnen nicht bekannt. Sie haben sich freiwillig zum Test bereiterklärt und haben alle mit großem Interesse und Engagement mitgemacht. Pro Proband dauerte der Test ungefähr 30 Minuten, eine Zeit, in der man noch Ermüdungserscheinungen ausschließen kann. Trotzdem meinten einige Probanden, daß der Test sehr anstrengend sei und daß man sich sehr konzentrieren müsse. Zur besseren Konzentration schlossen die Probanden ihre Augen beim Test.



Die durchschnittliche Hörkurve der Probanden

3. Versuchsaufbau und Durchführung

Bei den Probanden wurde zuerst das Gehör mit einem Tonaudiogramm getestet. Nur die Probanden wurden zum eigentlichen Test zugelassen, deren Hörverlust bei höchstens einer der Frequenzen 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz, 8000 Hz den Wert von 10 dB überstieg, aber noch unter 20 dB blieb. Beschallt wurde dann das besser hörende Ohr über Kopfhörer. Die Probanden wurden ausführlich unterwiesen:

1. daß sie das, was sie hören, sofort nachsprechen sollen
2. daß es sich um einsilbige, sinnvolle Hauptwörter handelt
3. daß sie auch raten und kombinieren können, wenn sie das Wort nicht ganz verstanden haben
4. daß sie zur besseren Konzentration die Augen schließen können.

Die erste Gruppe des Freiburger Wörtertests wurde zum Einhören und daran gewöhnen gegeben.

Die Probanden wurden willkürlich in die Gruppen A, B, C eingeteilt. Dann wurde nach folgendem Programm zur Durchführung der Untersuchungen verfahren: z.B. Proband in Gruppe A eingeteilt, Wörtergruppe 1 wird zum Einhören mit 60 dB dargeboten, dann folgen die Wörtergruppen 2, 3, 4 schwach verzerrt, wobei Gruppe 2 mit 60 dB Lautstärke, Gruppe 3 mit 45 dB Lautstärke und Gruppe 4 mit 30 dB Lautstärke dargeboten werden.
Dann folgen die Wortgruppen 5, 6, 7 mittel verzerrt, dann die Wortgruppen 8, 9, 10 stark verzerrt mit der Lautstärkenreihenfolge laut - mittel - leise.
Die Probanden wurden in die Gruppen A, B, C eingeteilt, um eventuelle Einflüsse von der Reihenfolge des Verzerrungsgrades und der Ungleichheit der Gruppen untereinander zu eliminieren.

4. Programm zur Durchführung der Untersuchungen

A	1.	laut	zum Einhören
	2.	laut	schwach verzerrt
	3.	mittel	
	4.	leise	
	5.	laut	mittel verzerrt
	6.	mittel	
	7.	leise	
	8.	laut	stark verzerrt
	9.	mittel	
	10.	laut	
B	1.	laut	zum Einhören
	5.	laut	stark verzerrt
	6.	mittel	
	7.	leise	
	8.	laut	schwach verzerrt
	9.	mittel	
	10.	leise	
	2.	laut	mittel verzerrt
	3.	mittel	
	4.	leise	
C	1.	laut	zum Einhören
	8.	laut	mittel verzerrt
	9.	mittel	
	10.	leise	
	2.	laut	stark verzerrt
	3.	mittel	
	4.	leise	
	5.	laut	schwach verzerrt
	6.	mittel	
	7.	leise	

5. Freiburger Wörtertest

1. Ring Spott Farm Hang Geist Zahl Hund Bach Floh Lärm Durst
   Teig Prinz Aas Schreck Nuß Wolf Braut Kern Stich

2. Holz Ruß Mark Stein Glied Fleck Busch Schloß Bart Ei
   Werk Dach Knie Traum Paß Kunst Mönch Los Schrift Fall

3. Blatt Stift Hohn Zweck Aal Furcht Leim Dorf Tat Kerl
   Schutz Wind Maus Reif Bank Klee Stock Wuchs Mist Gras

4. Schnee Wurst Zahn Pest Griff Laub Mund Grab Heft Kopf
   Reiz Frist Drang Fuß Öl Schleim Takt Kinn Stoß Ball

5. Punkt Ziel Fest Darm Schein Torf Lamm Wehr Glas Huf
   Spind Pfau Block Arm Neid Stroh Wurf Rest Blick Schlag

6. Seil Pfand Netz Flur Schild Ochs Draht Hemd Schmutz Rat
   Tau Milch Rost Kahn Tier Brot Dunst Haar Feld Schwein

7. Spiel Moos Lachs Glut Erz Baum Sand Reich Kuh Schiff
   Wort Hecht Mann Bruch Schopf Fels Kranz Teich Dienst Star

8. Luft Band Kost Ski Feind Herr Pflug Tal Gift Raum Ernst
   Zeug Fach Groll Speck Sitz Moor Last Krach Schwung

9. Schmerz Thron Eis Funk Baß Rind Lehm Grog Blei Markt
   Schilf Hut Zank Korb Lauf Dank Sarg Kies Schnur Pech

10. Horn Pfeil Kamm Turm Spieß Laus Recht Zopf Schall Mais
    Fell Gramm Ohr Sieb Pracht Lump Gips Bad Sprung Dreck

6. Apparatur und Ermittlung der Meßwerte

Es wurde mit dem Audiometer Beomat 4000 SR von der Firma Siemens audiometriert.

Die Wörter des Freiburger Wörtertests wurden mit dem Rechner Intertechnique Plurimat S nulldurchgangsverzerrt.

Hat der Proband das Wort richtig nachgesprochen, so wurde das im Audiogrammformular durch einen Strich am entsprechenden Wort markiert. Hat der Proband etwas anderes gesagt, so wurde das notiert, um zu sehen, wie sich die Verzerrung auf das Verständnis von einzelnen Lauten auswirkt.

Die Wörter des Freiburger Wörtertests wurden nach Siebs(61), Deutsche Aussprache 19. Auflage Walter de Gruyter + Co. Berlin 1969 in Lautschrift übertragen und nach diesem Schema wurden dann die falsch verstandenen Wörter analysiert.

C. ERGEBNISSE

Für die Verständlichkeit der Wörter macht sich die Verzerrung bei einer Lautstärke von 60dB stärker bemerkbar als bei einer Lautstärke von 45dB und viel stärker bemerkbar als bei einer Lautstärke von 30dB. Daraus folgt, daß eine Abhängigkeit besteht zwischen Verzerrung und Verständlichkeit von einsilbigen Hauptwörtern.
Bei Lautstärken über 60dB änderte sich bei allen drei Verzerrungsgraden die Verständlichkeit im Vergleich zu der bei 60dB nicht mehr. Sie blieb auf gleichem Niveau. (geprüft mit n=11)

Bei der Auswertung nach Lauten kam heraus, daß die Verzerrung einen großen Einfluß auf die Verständlichkeit der Laute bei 60dB und einen kleineren bei 45dB, jedoch keinen mehr bei 30dB hat. Erklärt werden kann dies folgendermaßen:
Bei 30dB wird schon soviel geraten und nicht gehört, daß die Verzerrung von anderen Phänomenen überlagert und kompensiert wird.

Wenn man die Laute einzeln betrachtet, so fällt auf, daß der Laut /f/ am schlechtesten verstanden wird. Auch werden die Konsonanten /h/, /g/, /b/, /p/, /s/, /t/ schlechter verstanden als die anderen Laute. Bei starker Verzerrung werden noch die Laute /x/ und /ʃ/ schlecht verstanden. Ansonsten kann man sagen, je stärker die Verzerrung, umso größer ist die Unverständlichkeit der Laute. Die Verzerrung wirkt sich hauptsächlich auf die Verständlichkeit der Konsonanten negativ aus. Die Vokale werden durch die Verzerrung kaum verändert und werden immer gut verstanden. Dies kommt daher, weil die Konsonanten von Natur aus geringere Intensitäten haben als die Vokale und daher von der Nulldurchgangsverzerrung stärker verändert werden. Für die Verständlichkeit sind die Konsonanten aber von entscheidender Bedeutung.

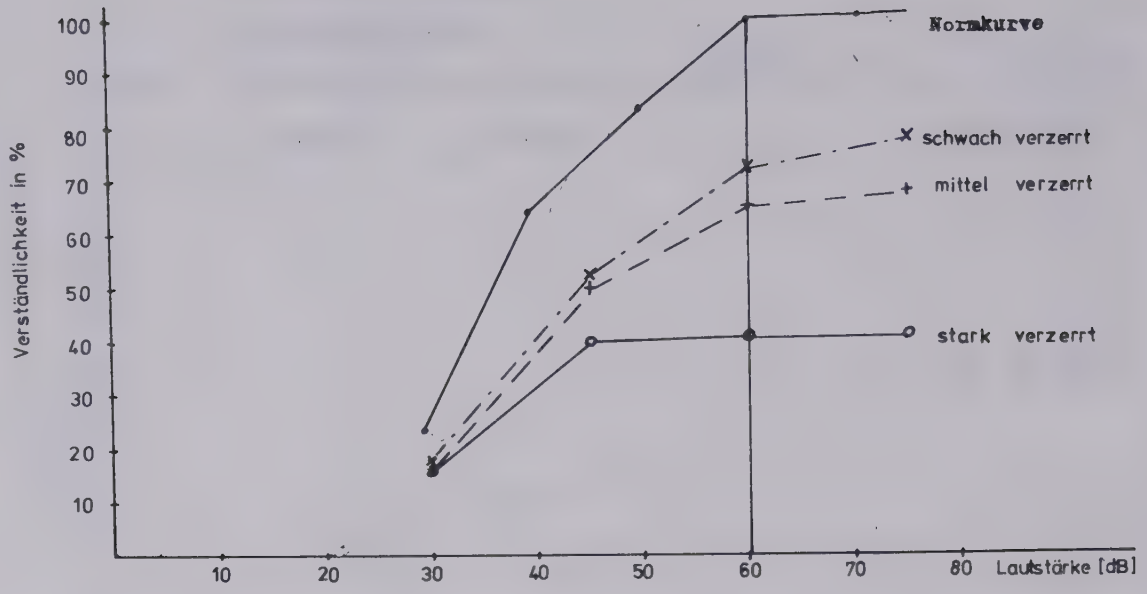


Abb. 2 : Verständlichkeit der Wörter in Abhängigkeit von der Lautstärke bei Normalhörenden

(bis 60 dB mit n=19, ab 60 dB mit n=11 Versuchspersonen)

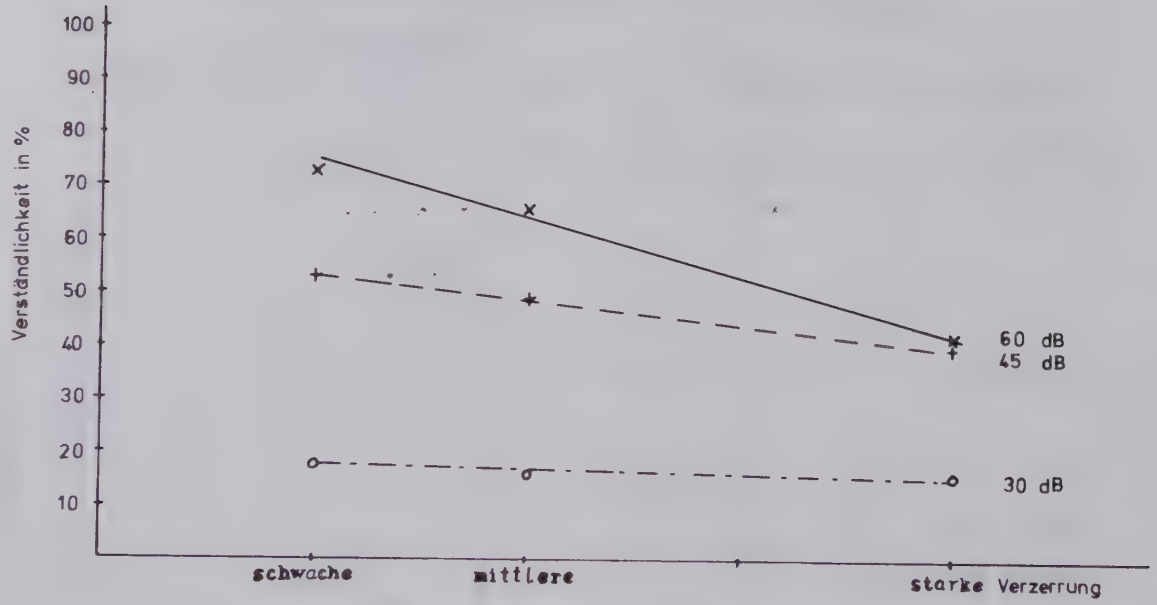


Abb. 3: Verständlichkeit der Wörter in Abhängigkeit von der Verzerrung bei Normalhörenden
(n = 19 Versuchspersonen)

Tabelle 1 : Nach Wörtern ausgewertet, pro Gruppe 20 Wörter, bei n = 19 Probanden. Kombination Verzerrung/Lautstärke

schwach verzerrt			mittel verzerrt			stark verzerrt		
60dB	45dB	30dB	60dB	45dB	30dB	60dB	45dB	30dB
17	13	1	11	9	3	6	8	2
13	12	7	15	10	5	12	8	5
16	12	3	15	9	2	14	7	2
17	15	3	11	11	4	10	8	3
16	14	4	12	9	3	9	9	5
16	10	3	10	10	4	7	6	1
17	15	2	13	10	3	8	6	5
17	9	2	18	13	6	6	6	3
18	11	5	15	11	5	6	9	8
16	10	2	15	10	2	6	10	3
12	9	3	15	11	1	7	9	2
19	11	5	14	13	7	8	11	6
13	10	1	10	12	4	8	6	5
10	7	3	12	8	0	7	9	2
11	9	6	13	9	3	7	7	2
12	5	4	12	7	3	9	5	2
13	10	7	10	11	4	9	11	2
12	10	3	15	7	2	10	9	2
14	10	4	14	7	1	11	8	1
14,7	10,6	3,6	13,2	9,8	3,3	8,4	8,0	3,2
73%	53%	18%	66%	49%	16%	42%	40%	16%

Tabelle 2 : Nach Wörtern ausgewertet, pro Gruppe 20 Wörter, bei n = 11 Probanden, Kombination Verzerrung/ Lautstärke

schwach verzerrt			mittel verzerrt			stark verzerrt		
75dB	60dB	45dB	75dB	60dB	45dB	75dB	60dB	45dB
16	15	12	12	9	9	8	7	10
17	18	9	11	11	10	11	8	6
16	18	10	14	13	13	10	9	7
17	17	13	18	16	12	9	7	10
18	17	11	17	14	11	7	10	9
16	14	9	16	12	10	8	13	8
13	15	9	12	10	12	8	8	7
16	13	6	13	11	9	6	11	9
14	13	9	14	12	11	10	10	8
14	14	13	12	10	10	7	9	11
14	14	13	11	9	9	8	7	7
15,5	15,3	10,4	13,6	11,5	10,5	8,4	9,0	8,4
78%	77%	52%	68%	58%	53%	42%	45%	42%

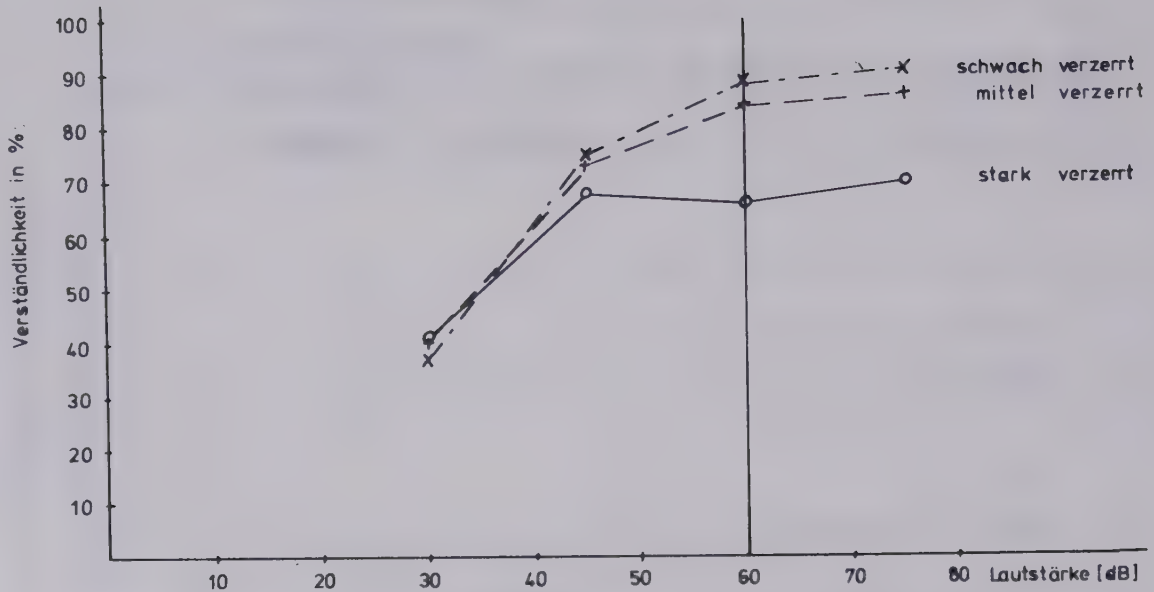


Abb. 4 : Verständlichkeit der Laute in Abhängigkeit von der Lautstärke bei Normalhörenden

(bis 60 dB mit n = 19, ab 60 dB mit n = 11 Versuchspersonen)

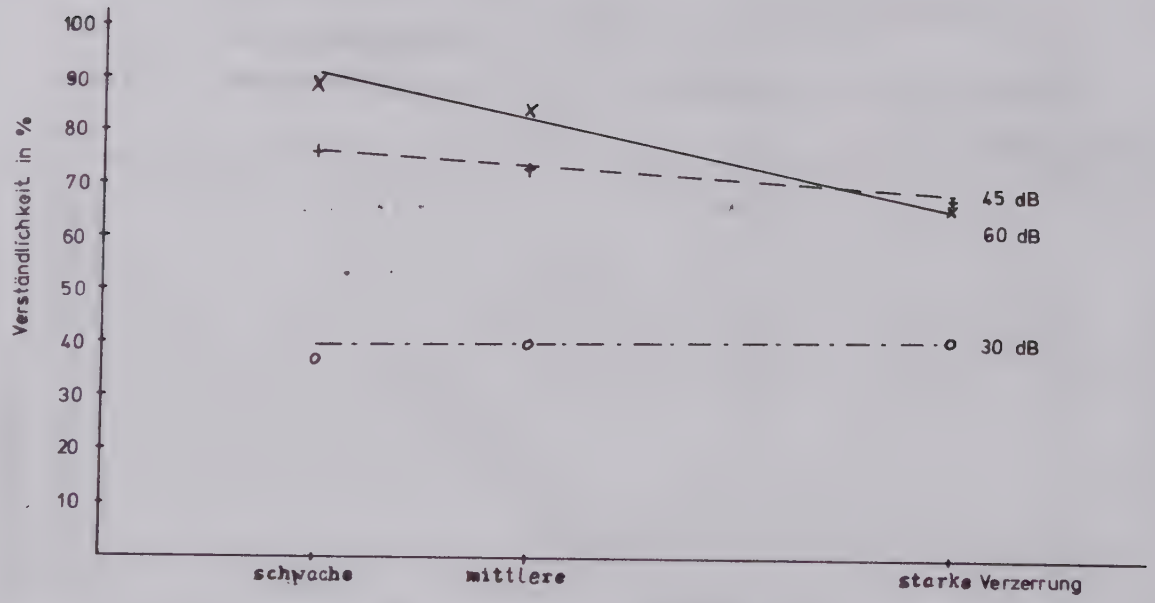


Abb. 5 : Verständlichkeit der Laute in Abhängigkeit von der Verzerrung bei Normalhörenden

(n = 19 Versuchspersonen)

Tabelle 3 : Nach Lauten ausgewertet, bei n = 19 Probanden
Kombination Verzerrung/Lautstärke

schwach verzerrt			mittel verzerrt			stark verzerrt		
60dB	45dB	30dB	60dB	45dB	30dB	60dB	45dB	30dB
70	59	4	54	56	19	36	51	25
61	58	44	66	51	37	62	54	48
69	53	25	66	51	25	59	51	24
69	61	25	57	60	25	48	52	34
68	62	26	59	51	26	47	57	38
69	51	27	50	49	32	48	50	33
69	60	22	57	60	34	38	49	44
70	53	35	71	59	45	37	41	31
67	60	38	60	56	37	32	45	37
68	57	32	67	50	28	34	52	33
54	54	14	65	51	19	34	48	12
72	64	35	68	59	46	47	54	35
65	49	9	60	56	31	50	47	24
57	55	13	59	53	6	58	51	16
59	50	30	62	57	31	57	51	29
57	37	26	56	45	18	53	38	20
64	61	38	56	56	43	56	50	37
65	58	29	65	43	23	56	50	23
64	58	35	66	52	23	62	53	27
65,1	55,8	26,7	61,3	53,4	28,8	48,0	49,7	30,0
89%	76%	37%	84%	73%	40%	66%	68%	41%

Tabelle 4 : Nach Lauten ausgewertet, bei n = 11 Probanden
Kombination Verzerrung/Lautstärke

schwach verzerrt			mittel verzerrt			stark verzerrt		
75dB	60dB	45dB	75dB	60dB	45dB	75dB	60dB	45dB
69	61	57	52	56	50	41	48	52
70	71	48	61	60	57	58	59	54
69	70	58	63	62	59	56	59	56
70	70	58	71	69	58	53	51	56
71	70	61	70	66	58	40	55	51
69	66	49	67	54	46	40	59	50
64	66	54	62	62	61	57	47	52
64	62	42	63	59	59	53	55	51
65	63	49	64	65	60	60	57	50
65	66	61	64	62	60	55	56	57
63	63	58	57	60	56	53	48	50
67,2	66,2	54,1	63,1	61,4	56,7	51,5	54,0	52,6
92%	91%	74%	86%	84%	78%	70%	74%	72%

3. Statistische Auswertung:

Die Daten der Dissertation wurden durch Anpassung von "logit-Modellen" mit Hilfe des Programmpakets GLIM 3 analysiert.
Der Quotient $\frac{\text{Anzahl verstanden}}{\text{Anzahl nicht verstanden}}$ wurde für jede Kombination (Verzerrung i , Lautstärke j) (i , j = 1,...,3) dargestellt durch den log linearen Term:

$$\log q_{ij} = u + (V)_i + (L)_j + (V \times L)_{ij}$$

Alle Haupt- und Wechselwirkungseffekte waren signifikant.
($p < 0{,}05$)

Die Logit-Analyse führt zu folgender Interpretation:

Abhängigkeit der Verständlichkeitsquote $\frac{\text{Anzahl verstanden}}{\text{Anzahl nicht verstanden}}$ sowohl vom Verzerrung als auch von Lautstärke, wobei der Lautstärkeeinfluß bei stärkeren Verzerrungen geringer ist.

Diese statistische Auswertung wurde vom Institut für Medizinische Biometrie der Universität Tübingen durch Herrn Diplom - Mathematiker Deichsel durchgeführt.

1.	riŋ, ʃpɑt, farm, haŋ, gɑɛst, tsɑ:l, hunt, bax, flɑ:, lɛrm, durst, tɑɛk, prints, ɑ:s, ʃrɛk, nus, vɔlf, brɑɛt, kɛrn, ʃtiç
2.	hɔlts, ru:s, mark, ʃtɑen, gli:t, flɛk, buʃ, ʃlɔs, bɑ:rt, ɑɛ, vɛrk, dax, kni:, trɑɛm, pas, kunst, mɑɛnç, lɑ:s, ʃrift, fal
3.	blat, ʃtift, hɑ:n, tsvɛk, ɑ:l, furçt, lɑɛm, dɔrf, tɑ:t, kɛrl, ʃuts, vint, mɑɔs, rɑɛf, baŋk, kle:, ʃtɔk, vu:ks, mist, gras
4.	ʃne:, vurst, tsɑ:n, pɛst, grif, lɑɔp, munt, grɑ:p, hɛft, kɔpf, rɑɛts, frist, draŋ, fu:s, ø:l, ʃlɑɛm, takt, kin, ʃtɑ:s, bal
5.	puŋkt, tsi:l, fɛst, darm, ʃɑɛn, tɔrf, lam, ve:r, glɑ:s, hu:f, ʃpint, pfɑɔ, blɔk, arm, nɑɛt, ʃtro:, vurf, rɛst, blik, ʃlɔk
6.	zɑɛl, pfant, nets, flu:r, ʃilt, ɔks, drɑ̈:t, hɛmt, ʃmuts, rɑ:t, tɑɔ, milç, rɔst, kɑ:n, ti:r, brɑ:t, dunst, hɑ:r, fɛlt, ʃvɑɛn
7.	ʃpi:l, mɑ:s, laks, glu:t, e:rts, bɑɔm, zant, rɑɛç, ku:, ʃif, vɔrt, hɛçt, man, brux, ʃɔpf, fɛls, krants, tɑɛç, di:nst, ʃtar
8.	luft, bant, kost, ʃi:, fɑɛnt, hɛr, pflu:k, tɑ:l, gift, rɑɔm, ɛrnst, tsɔyk, fax, grɔl, ʃpɛk, zits, mɑ:r, last, krax, ʃvuŋ
9.	ʃmɛrts, trɑ:n, ɑɛs, fuŋk, bas, rint, le:m, grɔk, blɑɛ, markt, ʃilf, hu:t, tsaŋk, kɔrp, lɑɔf, daŋk, zark, ki:s, ʃnu:r, pɛç
10.	hɔrn, pfɑɛl, kam, turm, ʃpi:s, lɑɔs, rɛçt, tsɔpf, ʃal, mɑɛs, fɛl, gram, ɑ:r, zi:p, praxt, lump, gips, bɑ:t, ʃpruŋ, drɛk

Tab. 5: Aufschlüsselung der einzelnen Wörter in den Gruppen 1 bis 10 des Freiburger Wörtertests nach Lauten

(Siebs: Deutsche Aussprache. - 19. Aufl. - Berlin.: Walter de Gruyter 1969)

REIBELAUTE		VERSCHLUßLAUTE		NASENLAUTE
stimmlos	stimmhaft	stimmlos	stimmhaft	
/f/ = Fuß	/v/ = Wahl	/p/ = Pult	/b/ = Bach	/m/ = Mann
/s/ = Saft	/z/ = Sohn	/t/ = Tat	/d/ = Dach	/n/ = Nest
/ʃ/ = Schiff		/k/ = Kraft	/g/ = Gruß	/ŋ/ = Klang
/ç/ = Licht				
/x/ = Dach				
/h/ = Haus				

FLIEßLAUTE		VOKALE	
Seitenlaut	Schwinglaut	/i/ = Igel	/u/ = Uhr
/l/ = Lump	/r/ = Reck	/e/ = Weg	/ɛ/ = Geld
DIPHTHONGE		/a/ = Arm	/y/ = Glück
/ae/ = Eimer	/ao/ = Baum	/o/ = Ofen	/ø/ = Öl
/ɔy/ = Heu		/ɔ/ = Ort	/oe/ = Mönch

Tab. 6 : Beschreibung der einzelnen Laute, die in den Gruppen 1 bis 10 des Freiburger Wörtertests vorkommen

	/f/	/s/	/ʃ/	/ç/	/x/	/h/	/v/	/z/	/p/	/t/	/k/	/b/	/d/	/g/	/m/	/n/	/ŋ/	/l/	/r/	/a/	/ɐ/	/ɔ/	/y/	/i/	/e/	/a/	/o/	/ɔ/	/u/	/ɛ/	/y/	/ø/	/œ/	/e/	
1.	3	6	3	1	1	2	1	0	2	9	3	2	1	1	2	4	2	4	8	2	1	0	3	0	5	1	2	3	3	0	0	0	75
2.	3	6	4	1	1	1	1	0	1	7	5	2	1	1	3	4	0	6	6	2	1	0	3	0	5	1	2	3	2	0	0	1	73
3.	4	6	3	1	0	1	3	0	0	11	6	2	1	1	3	2	1	5	5	2	1	0	3	1	5	1	2	3	2	0	0	0	75
4.	5	7	3	0	0	1	1	0	4	10	3	1	1	2	2	4	1	4	6	2	1	0	3	1	5	1	1	3	2	0	1	0	75
5.	5	4	4	0	0	1	2	0	3	8	4	2	1	1	3	3	1	6	7	2	1	0	3	1	5	1	2	3	2	0	0	0	75
6.	3	5	3	1	0	2	1	1	1	13	2	1	2	0	3	5	0	5	7	2	1	0	3	0	5	1	2	3	3	0	0	0	75
7.	3	6	4	3	1	1	1	1	2	9	3	2	1	1	3	4	0	4	6	2	1	0	3	1	5	1	2	3	2	0	0	0	75
8.	5	5	3	0	2	1	1	1	2	10	5	1	0	2	2	3	1	5	6	1	1	1	3	0	5	1	2	3	3	0	0	0	75
9.	3	5	3	1	0	1	0	1	2	6	8	2	1	1	3	3	3	4	8	2	1	0	3	1	5	1	2	3	2	0	0	0	75
10.	3	5	3	1	1	1	0	1	7	5	2	1	1	2	5	1	1	5	8	2	1	0	3	0	5	1	2	3	3	0	0	0	74

Tab. 7: Anzahl der einzelnen Laute in den Gruppen 1 bis 10 des Freiburger Wörtertests

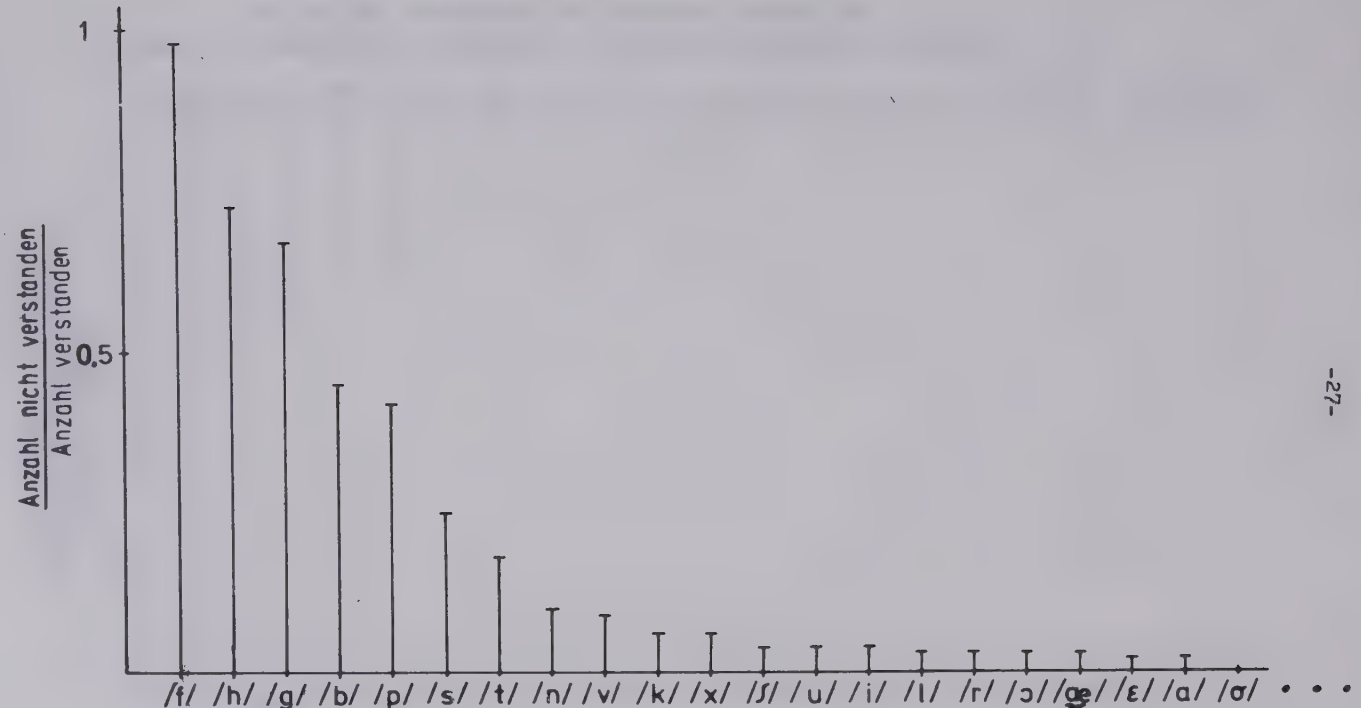


Abb. 6: Quantitative Darstellung der Unverständlichkeit einzelner Laute bei 60 dB Lautstärke und schwacher Verzerrung

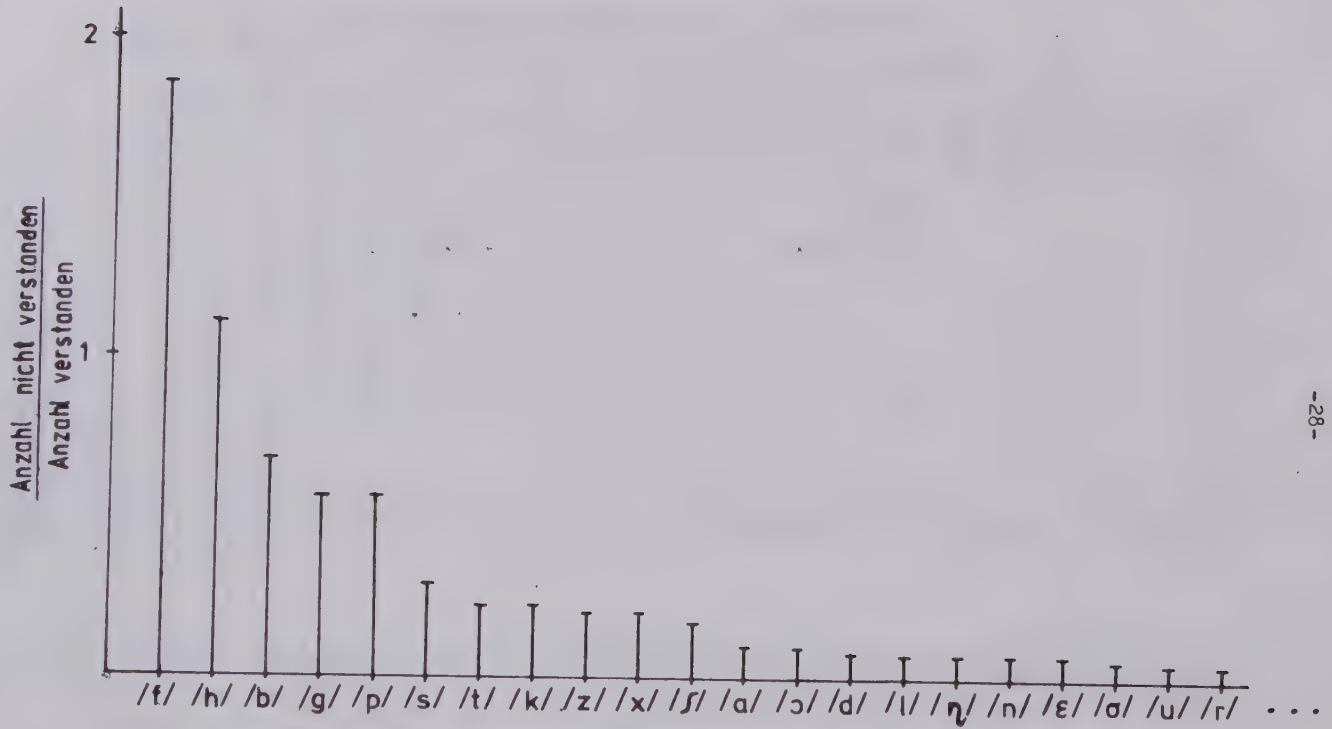


Abb. 7: Quantitative Darstellung der Unverständlichkeit einzelner Laute bei 60 dB Lautstärke und mittlerer Verzerrung

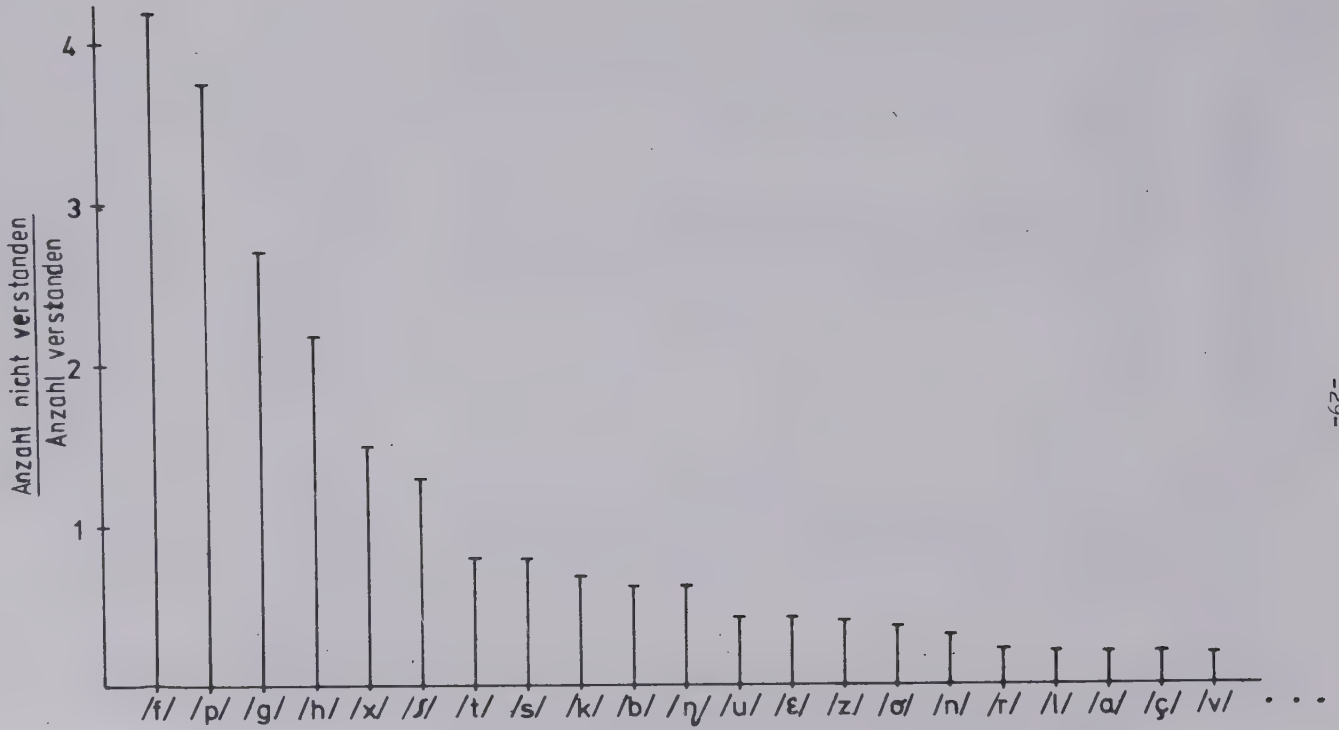


Abb. 8: Quantitative Darstellung der Unverständlichkeit einzelner Laute bei 60 dB Lautstärke und starker Verzerrung

Tab. 8: Reihenfolge der Laute schlecht verstanden bis gut verstanden nach der Lautstärke, nach dem Rhyme Test und nach der Verzerrung.

Lautstärke	Rhyme Test	starke Verzerrung bei 60 dB
leise	schlecht verst.	schlecht verstanden
1. /h/	1. /z/	1. /f/
2. /f/	2. /v/	2. /p/
3. /b/	3. /t/	3. /g/
4. /d/	4. /h/	4. /h/
5. /g/	5. /p/	5. /x/
6. /x/	6. /s/	6. /ʃ/
7. /k/	7. /dʒ/	7. /t/
8. /t/	8. /d/	8. /s/
9. /p/	9. /k/	9. /k/
10. /r/	10. /r/	10. /b/
11. /s/	11. /w/	11. /ŋ/
12. /v/	12. /b/	12. /u/
13. /z/	13. /l/	13. /ɛ/
14. /ʃ/	14. /f/	14. /z/
15. /l/	15. /g/	15. /o/
16. /m/	16. /j/	16. /n/
17. /ŋ/	17. /n/	17. /r/
18. /n/	18. /m/	18. /l/
.	.	.
.	.	.
.	.	.
laut	gut verstanden	gut verstanden

4.5. Differenzierte Betrachtung der Verständlichkeit von einzelnen Lauten im Wort:

Wortgruppe 2 bei 60 dB: Das /t/ in Traum und das /f/ im Anlaut bei Fall wurden nie gehört, d.h. auch schon durch die schwache Verzerrung werden die Konsonanten /t/ und /f/ im Anlaut auf Null gesetzt. Ein bißchen anders ist es im Wort Fleck. Hier tritt dieser Effekt erst bei starker Verzerrung auf, während bei mittlerer Verzerrung noch 50% der Probanden das Wort richtig hörten. Ähnlich gelagert ist der Fall bei Glied. Der Konsonant /g/ wird im Anlaut bei starker Verzerrung nicht mehr gehört. Auch macht sich die starke Verzerrung bei den Konsonanten /ʃ/ im Wort Stein bemerkbar. Während bei schwacher Verzerrung noch fast alle Probanden das Wort richtig gehört hatten, hat es bei starker Verzerrung nur noch einer richtig gehört. Auch das /s/ in Los wurde bei starker Verzerrung nur noch von einem Drittel der Probanden richtig gehört. Auch das scharfe /s/ in Paß wird bei starker Verzerrung kaum noch gehört. Auch das /ʃ/ und /s/ in Schloß werden bei starker Verzerrung nicht mehr gehört. Ebenso das scharfe /s/ in Ruß, das auch schon bei mittlerer Verzerrung schlecht gehört wird. Auffallend ist noch, daß bei dem Wort Mark öfter noch ein /t/ bei mittlerer und starker Verzerrung hinzugesetzt wird und Mark dann zu Markt wird.
Zusammenfassung: /t/ und /f/ im Anlaut werden schon bei schwacher Verzerrung sehr schlecht gehört. Steht nach dem /f/ noch ein Konsonant, wie in Fleck, so wird das Verstehen etwas besser und erst bei starker Verzerrung tritt ein deutlicher Hörverlust auf. Es handelt sich um Klaster, um Doppellaute, die nur gemeinsam auftreten. Ähnlich ist es, wenn /f/ im Wortinneren steht. Bei starker Verzerrung macht sich die Verzerrung auf die Sprachverständlichkeit auch bei /ʃ/, /g/ und /s/ Lauten bemerkbar.

Wortgruppe 8 bei 60 dB: Das /f/ in Feind und Fach ist schon bei schwacher Verzerrung nicht gehört worden. Bei mittlerer Verzerrung ist der /k/ Laut im Wort Krach sehr schwer gehört worden. Auch der /p/ Laut wurde durch die mittlere Verzerrung gelöscht. Das /g/ in Groll wurde bei starker Verzerrung undeutlich. Auch das /t/ in Tal wird bei starker Verzerrung nicht mehr gehört, bei mittlerer und schwacher Verzerrung nur zu 50%. Auch das /p/ in Speck war bei starker Verzerrung sehr undeutlich zu erkennen. Das /h/ in Herr wird durch die starke Verzerrung fast unhörbar. Auch das am Ende stehende /t/ in Luft verliert mit zunehmender Verzerrung an Deutlichkeit.

Wortgruppe 5 bei 60 dB: /f/ in Wurf wird sehr schlecht gehört. /f/ und /s/ in Fest werden bei allen Verzerrungsstufen sehr schlecht gehört. /g/ und /s/ in Glas werden bei allen Verzerrungsstufen sehr schlecht gehört. /h/ und /f/ im Wort Huf werden schlecht gehört. /f/ im Wort Pfau wird schlecht gehört. Der Laut /b/ im Wort Block wird sehr schlecht gehört. Bei starker Verzerrung wird der Laut /ʃ/ im Wort Schlag sehr schlecht gehört und er wird nur bei starker Verzerrung im Wort Stroh schlecht gehört. Das /s/ im Wort Rest wird bei sehr starker Verzerrung schlecht gehört. Die Laute /ʃ/, /p/ im Wort Spind werden sehr schlecht bei starker Verzerrung verstanden. Bei mittlerer und starker Verzerrung fällt das /f/ und /t/ heraus in Torf. Der /ʃ/ Laut in Schein verschwindet bei starker Verzerrung. Statt Huf wird sehr oft Buch gehört.

Wortgruppe 3 bei 45 dB: Der Laut /t/ im Wort Tat wurde sehr schlecht verstanden. Der Laut /s/ im Wort Zweck wurde vor allen Dingen bei starker Verzerrung schlecht gehört. Der Laut /s/ in den Wörtern Gras, Mist und Wuchs wurden schlecht gehört. Bei starker Verzerrung ist auch der /ʃ/ Laut sehr undeutlich. Der Laut /b/ im Wort Blatt ist auch sehr schwierig zu verstehen.

Wortgruppe 9 bei 45 dB: Die Laute /b/, /f/ und /s/ wurden sehr schlecht verstanden. Die Laute /ʃ/, /g/ und /p/ wurden bei starker Verzerrung schlecht verstanden.

Wortgruppe 6 bei 45dB: Die Laute/p/ ,/d/ ,/k/ ,/f/ wurden bei allen Verzerrungen schlecht verstanden. Der Laut/t/war bei mittlerer Verzerrung sehr schwer zu verstehen. Der Laut/ʃ/ war bei starker Verzerrung sehr schwer zu verstehen.

Wortgruppe 10 bei 30dB: Gut verstanden wurden mur Ohr und Turm.

Wortgruppe 7 bei 30dB: Die Vokale werden immer sehr gut gehört. Gut verstanden wurde Baum und Schiff.

Wortgruppe 4 bei 30dB: Gut verstanden wurden Kopf und Öl. Mittelmäßig verstanden wurden Laub und Grab.
Wenn man bei einem Wort einen Laut weglassen kann und sich ein anderes sinnvolles Wort daraus ergibt, so wurde oft der weggelassene Laut nicht gehört und das andere Wort gesagt.
z.B. bei Fall wurde All gesagt
bei Ball wurde All gesagt
bei Traum wurde Raum gesagt.

4.6. 3-dimensionales Sonagramm

Zum 3-di. Sonagramm eignete sich am besten das Wort Furcht, bei dem sich die Verzerrung am stärksten ausgewirkt hat. Bei mittlerer Lautstärke (45dB) wurde es bei schwacher Verzerrung in 100% richtig verstanden , bei mittlerer Verzerrung in 50% und bei starker Verzerrung nie. Die Laute u und r wurden zwar verstanden , aber es fehlte am Laut F und am Laut t . So mußten sehr viele Probanden bei mittlerer und starker Verzerrung raten und kamen dann oft auf Burg , seltener auf Kurz oder Kurs.

Wenn man die 3-dimensionalen Bilder des Computers miteinander vergleicht, so sieht man, daß bei mittlerer und starker Verzerrung das schwache F verschwunden ist und daß bei starker Verzerrung die hochfrequenten Anteile, speziell das t , ganz verschwunden sind. So kann man sagen, daß durch die Nulldurchgangsverzerrung die hohen Frequenzen stärker geschwächt werden als die niedrigen Frequenzen.

Die Vokale, hier das/u/, werden wenig durch die Verzerrung verändert. Es sind mehr die Konsonanten . Diese Konsonanten sind schon von Natur aus leiser und höherfrequenter. Für das Sprachverständnis sind aber gerade diese Konsonanten von entscheidender Bedeutung. Erst wenn man die Konsonanten richtig versteht, versteht man auch das Wort richtig.

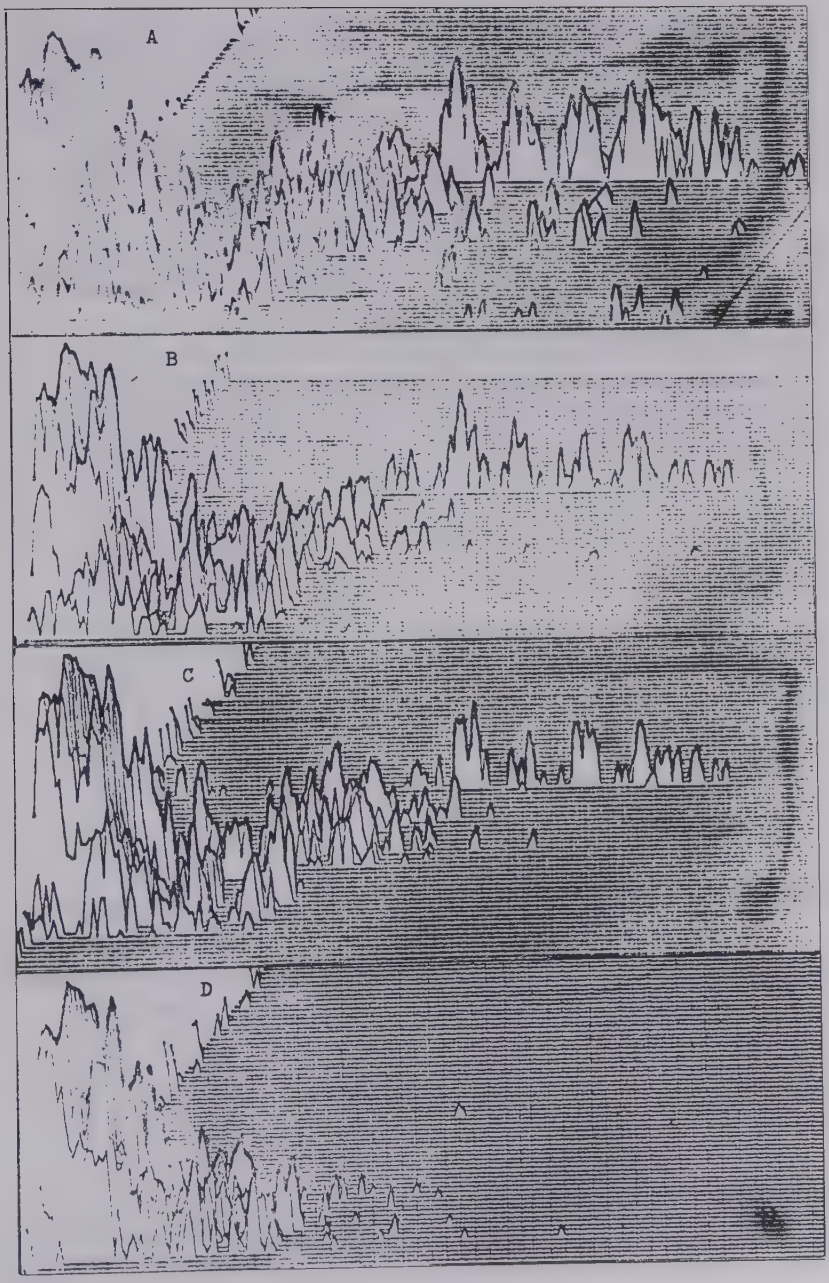
Die Nulldurchgangsverzerrung setzt die Pegel der Laute /f/, /ʃ/ und /t/ auf Null in Abhängigkeit vom Verzerrungsgrad.

Abb.9: A) 3-dimensionales Sonagramm des Wortes "Furcht" im Original des Freiburger Wörtertests. Auf der x-Achse ist die Frequenz von 0 bis 12 KHz aufgetragen, auf der y-Achse die Intensität und auf der z-Achse die Zeit.

B) Das Gleiche bei schwacher Verzerrung

C) Das Gleiche bei mittlerer Verzerrung

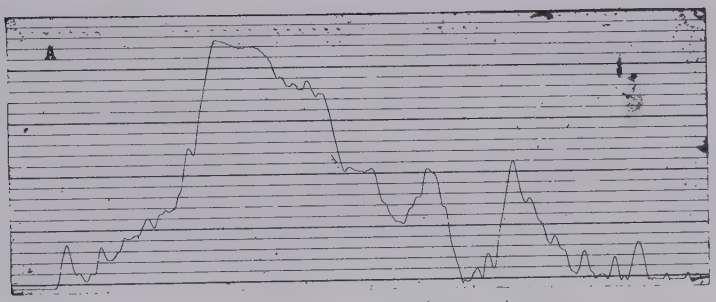
D) Das Gleiche bei starker Verzerrung


A
B
C
D

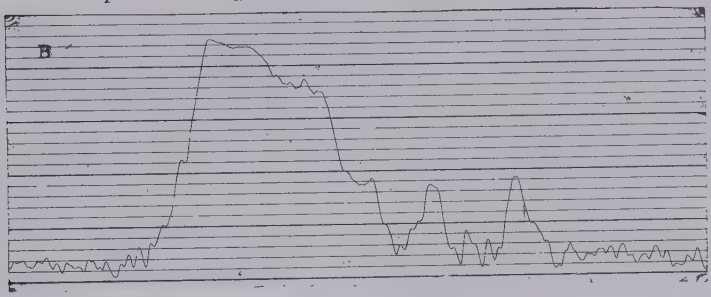
4.7. Pegelaufzeichnung des Wortes Furcht:

Bei der 2-dimensionalen Analyse des Wortes Furcht ist deutlich zu erkennen, wie die Anteile der Laute/f/,/ç/ ,/t/ mit zunehmender Verzerrung schrumpfen, während sich der Anteil für den Vokal /u/ fast konstant hält. Das erklärt, warum jeder Proband zwar den Laut/u/aber nicht jeder den Laut/f/oder den Laut/t/gehört hat. So dichtet dann der Proband aus ...ur... Burg.
Dies zeigt deutlich, daß der Vokal fast nicht durch die Verzerrung beeinflußt wird, während die Konsonanten stark abgeändert werden und ihre Intensität fast verlieren.
Die Konsonanten aber sind für das Verstehen eines Wortes von entscheidender Bedeutung. Die Nulldurchgangsverzerrung setzt die Pegel der Laute /f/, /c/, /t/ auf Null in Abhängigkeit vom Verzerrungsgrad.

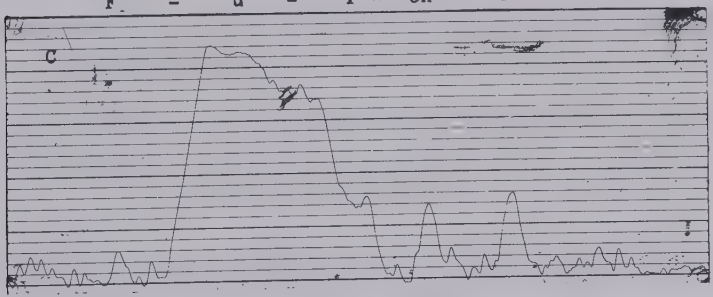
Abb.10: Pegelaufzeichnung des Wortes "Furcht". Auf der x-Achse ist die Zeit, auf der y-Achse die Intensität aufgetragen
A: Das Wort "Furcht" im Original des Freiburger Wörtertests
B: Das Wort "Furcht" bei schwacher Verzerrung
C: Das Wort "Furcht" bei mittlerer Verzerrung
D: Das Wort "Furcht" bei starker Verzerrung



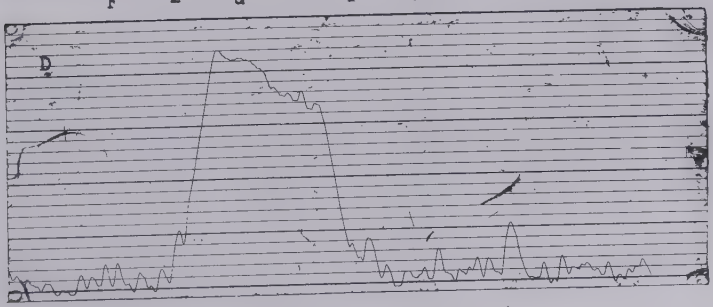
F - u - r - ch - t



F - u - r - ch - t



F - u - r - ch - t



F - u - r - ch - t

4.8. Pegelaufzeichnung der Wörter 1 - 10 der Gruppe 2 des Freiburger Wörtertests.

Im Wort Holz macht sich die Verzerrung hauptsächlich bei den Lauten/h/und/s/bemerkbar. Die Intensität des Lautes/s/sinkt umgekehrt proportional zur Steigerung der Verzerrung. Jedoch bleibt die Intensität des Vokals/ɔ/konstant. Für das Sprachverständnis macht sich erst die starke Verzerrung bemerkbar.

Beim Wort Ruß macht sich schon die schwache Verzerrung so stark bemerkbar, daß vom Laut/s/nichts mehr vorhanden ist. Dagegen nimmt der Vokal/u/auch bei starker Verzerrung nur ganz minimal an Intensität ab. Daraus ist ersichtlich, daß schon durch die schwache Verzerrung das Wort Ruß undeutlich wird und nur noch gering verstanden wird.

Beim Wort Mark macht sich erst die mittlere und starke Verzerrung beim Wortverständnis bemerkbar. Wenn man sich die 2-dimensionale Analyse des Wortes anschaut, so sieht man, daß bei schwacher Verzerrung der Anteil für den/k/Laut noch vorhanden ist, ab mittlerer Verzerrung fehlt dieser Anteil jedoch.

Beim Wort Stein verändert die Verzerrung hauptsächlich die Laute/ʃ/und/t/. Dies wirkt sich besonders bei mittlerer und starker Verzerrung auf das Sprachverständnis aus.

Beim Wort Glied verändert schon die schwache Verzerrung die Verständlichkeit des Lautes/g/, während die Verständlichkeit des Lautes/t/von der Verzerrung unbeeinflußt bleibt.

Beim Wort Fleck wird schon durch die schwache Verzerrung der Laut/f/schwächer, bei mittlerer und starker Verzerrung ist er nicht mehr vorhanden. Der Laut /k/verschwindet erst bei starker Verzerrung.

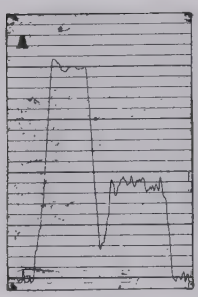
Bei dem Wort Busch macht sich die Verzerrung auf die Verständlichkeit nicht bemerkbar. Man sieht im Diagramm der 2-dimensionalen Analyse , daß zwar die Intensität etwas abnimmt, daß aber jeder Lautanteil noch vorhanden ist.

Beim Wort Schloß macht sich erst die starke Verzerrung auf das Verständnis bemerkbar. Dies sieht man im Diagramm, wie die Lautanteile der Laute/ʃ/und/s/bei starker Verzerrung sehr stark vermindert sind.

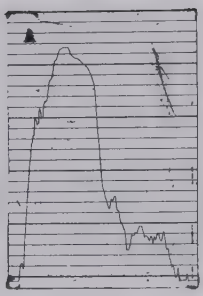
Beim Wort Bart fällt der Anteil für den Laut/t/bei starker Verzerrung ganz raus, dadurch wird das Verständnis des Wortes Bart bei starker Verzerrung schlechter.

Bei dem Wort Ei hat die Verzerrung keinen Einfluß auf das Sprachverständnis. Dies sieht man auch im Diagramm. Die Intensität der Vokale/e/und/i/wird durch die Verzerrung kaum beeinflußt.

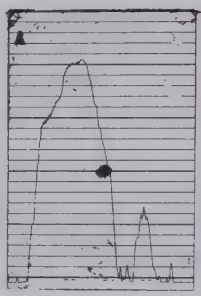
Abb. 11 - 13: Pegelaufzeichnung der Wörter 1 - 10 der Gruppe 2 des Freiburger Wörtertests. Auf der x-Achse ist die Zeit, auf der y-Achse die Intensität aufgetragen.
A: Im Original
B: Bei schwacher Verzerrung
C: Bei mittlerer Verzerrung
D: Bei starker Verzerrung



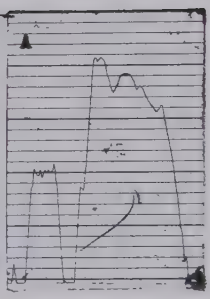
H-o--l--z



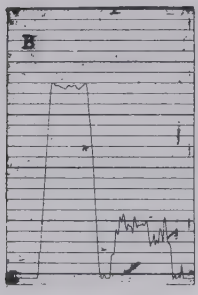
R--u-----ß



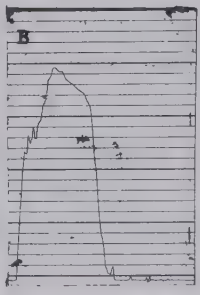
M--a--r--k



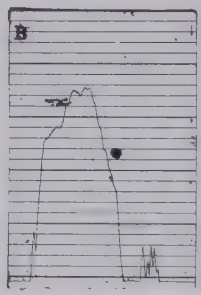
S-t--ei---n



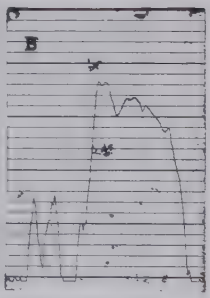
H-o--l--z



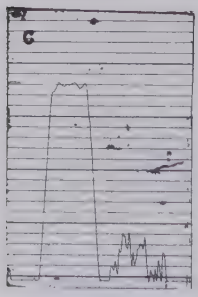
R--u-----ß



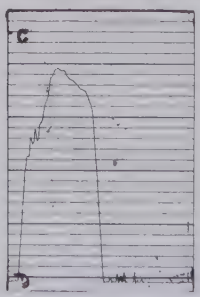
M--a--r--k



S-t--ei---n

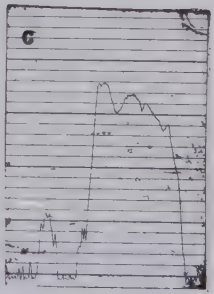


H-o--l--z

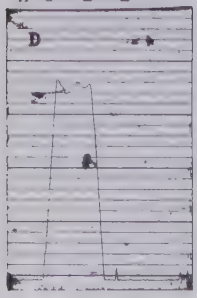


R--u-----ß

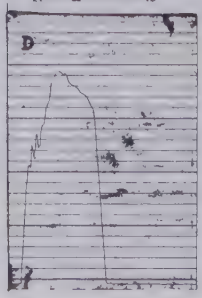
M--a--r--k



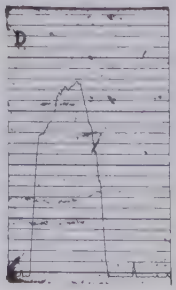
S-t--ei---n



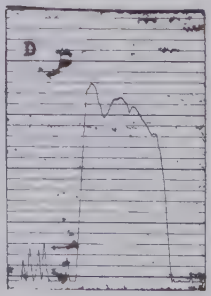
H-o--l--z



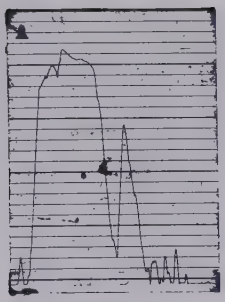
R--u-----ß



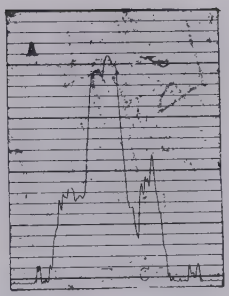
M--a--r--k



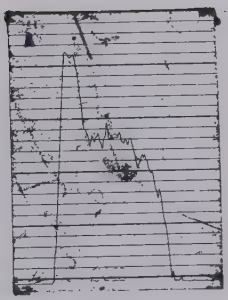
S-t--ei---n



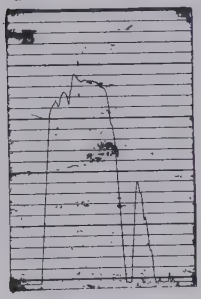
G-l-ie--d



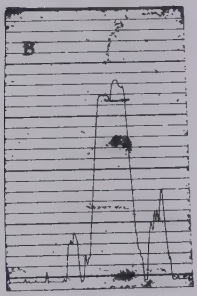
F-l--e--ck



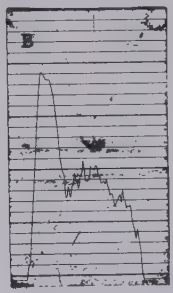
B-u-sch



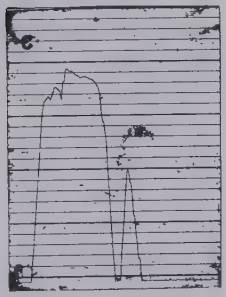
G-l-ie---d



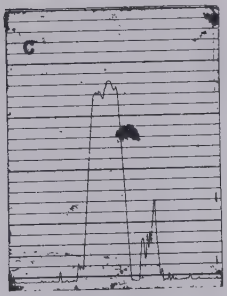
F-l--e--ck



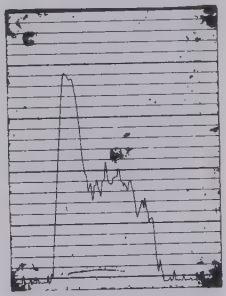
B-u-sch



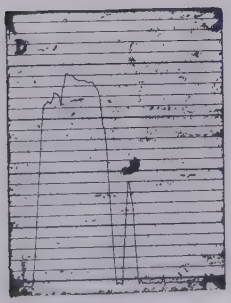
G-l-ie---d



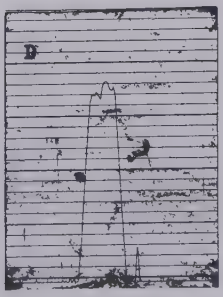
F-l-e-ck



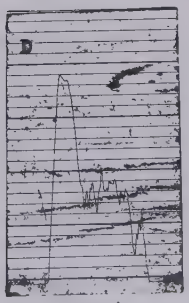
B-u-sch



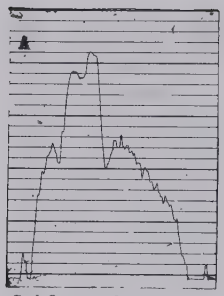
G-l-ie---d



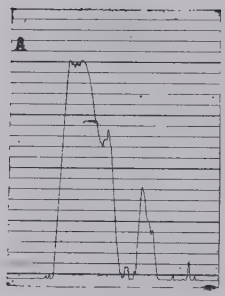
F-l-e-ck



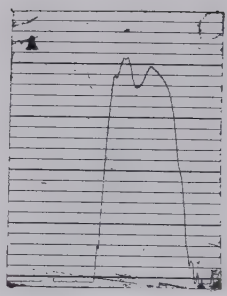
B-u-sch



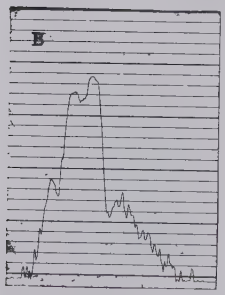
Schl-o--ß



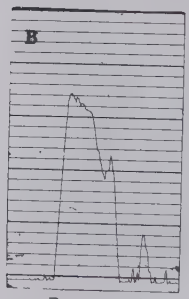
B-a-r--t



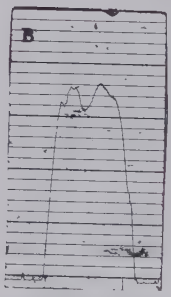
E--i



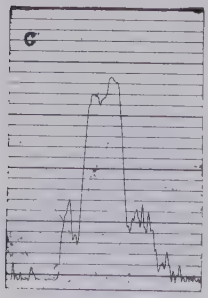
Schl-o--ß



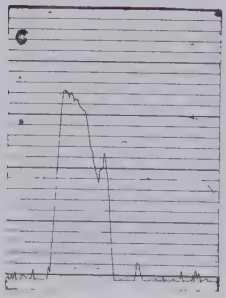
B-a-r--t



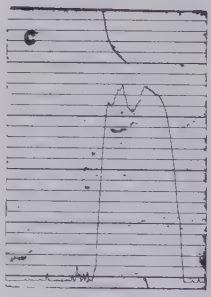
E--i



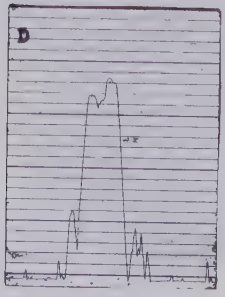
Sch-l-o--ß



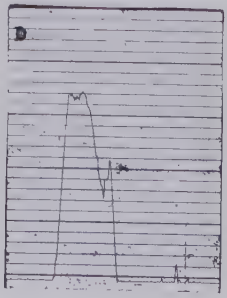
B-a-r--t



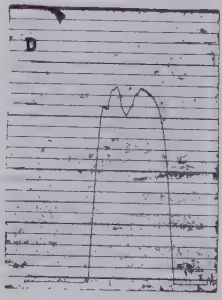
E--i



Sch-l-o--ß



B-a-r--t



E--i

D. DISKUSSION

Unserer Meinung nach gibt es auf dem Gebiet der Audiometrie wenige Untersuchungen, welche sich mit verzerrter Sprache beschäftigen. Dies ist sicherlich zu einem Großteil darin begründet, daß die Audiometrie als relativ junge Wissenschaft angesehen werden muß. Zu einem Zeitpunkt, da innerhalb der Fachwelt sogar bezüglich der anzuwendenden Untersuchungsmethoden kein generelles Einverständnis zu erkennen ist, erscheint es kaum verwunderlich, daß an einem Problem, wie dem Experimentieren mit nulldurchgangsverzerrter Sprache innerhalb der Audiometrie noch nicht intensiv gearbeitet wurde.

1. Phonetische Aspekte der Nulldurchgangsverzerrung

Sprache als Hauptwörter dargeboten bedeutet Reize mit hohem Informationsgehalt. Dadurch hat die Sprachaudiometrie bei guter Kooperation des Untersuchten gleichwohl einen hohen Grad an Zuverlässigkeit und Aussagekraft. Sie ist zugleich eine Prüfung, die das Hörvermögen in umfangreicheren Gebieten erfaßt als die reine Tonprüfung. Die Sprachaudiometrie erfaßt Schallanalyse und die Zerlegung des Gehörten. Die einzelnen Laute haben verschiedene Lautstärke, verschiedenen Energiegehalt, sind stimmhaft oder stimmlos. Dies führt offensichtlich zum unterschiedlichen Verständnis einzelner Laute. Siehe hiezu Abbildungen 6 - 8.

Die Konsonanten sind ohne Kehlkopfbeteiligung stimmlos wie /s/, /ʃ/, /f/ und haben einen regellosen Schalldruckverlauf. Auch die Verschlußlaute können stimmhaft (/b/,/d/,/g/) oder stimmlos sein (/p/,/t/,/k/). Bei normaler Sprache ist die Energie in den Vokalen konzentriert; die Konsonanten sind wesentlich leiser. Bei sehr lautem Sprechen wird dieser Unterschied noch größer, da die Vokale mehr verstärkt werden können. Bei der Flüstersprache entfallen dagegen diese Energiekonzentrationen in den Vokalen, so daß die Sprachlaute hinsichtlich der Intensität eingeebnet werden.

Unter erschwerten akustischen Bedingungen, wie bei Nulldurchgangs-

verzerrung, werden die Sprachlaute zum Teil nicht richtig identifiziert, und es treten typische Verwechslungen auf. Nach Miller und Mitarbeiter(44) ist die Unterscheidung zwischen stimmhaften und stimmlosen Lauten relativ wenig störempfindlich; auch wird die Bildungsart, ob Reibelaut, Plosivlaut oder Nasallaut gut erkannt. Durch die Nulldurchgangsverzerrung wird auch der Laut /f/, der ja nur eine schwache Intensität hat, unverständlich. Während die Vokale mit ihren hohen Intensitäten durch die Nulldurchgangsverzerrung wenig verändert werden, macht sich diese bei Lauten mit geringeren Intensitäten stark bemerkbar.

Nach Erich Dunker(11) spielen Ein- und Ausschwingvorgänge für die Sprachverständlichkeit eine wichtige Rolle. So stellte sich auch in unserer Untersuchung heraus, daß es auf den ersten Laut eines Wortes ankommt, ob dieses verstanden wird oder nicht. Bei der Untersuchung von verschiedenen Verzerrungen stellte Licklider (39) fest, daß extreme Nulldurchgangsverzerrung die Wörter mehr wie atmosphärische Störungen, als wie Sprache klingen läßt; daß andererseits sehr geringe Nulldurchgangsverzerrung keinen Einfluß auf das Wortverständnis hat. Wir haben bei den Verzerrungsgraden schwach, mittel und stark untersucht und stellten eine Abhängigkeit von der Lautstärke fest. Wir erkannten, daß durch die Nulldurchgangsverzerrung ein bestimmter Betrag der Intensität, je nach Stärke der Verzerrung , zu Null gesetzt wird. Dies wirkt sich natürlich auf die Verständlichkeit bei Lauten mit geringer Intensität wesentlich stärker aus, als auf die Verständlichkeit von Lauten mit hoher Intensität. Denn was wegen der Nulldurchgangsverzerrung nicht mehr da ist, kann auch nicht mehr gehört werden.

Grant Fairbanks(14) schreibt in seiner Abhandlung über den Rhyme - Test, daß die Nasallaute unter den Bedingungen des Rhyme - Tests am besten gehört werden, während zwei Drittel der stimmlosen Konsonanten zu den am schlechtesten gehörten Lauten zählen. Bei unserer Untersuchung wurden bei starker Verzerrung und 60 dB Lautstärke in der Reihenfolge die Laute /f/, /p/, /g/, /h/, /x/, /ʃ/ und /t/ am schlechtesten verstanden. Die Verzerrung

wirkt sich auf die Verständlichkeit dieser Laute am stärksten aus. Sie haben einen niederen Pegel, der durch die Nulldurchgangsverzerrung auf Null gesetzt wird.(Siehe Tabelle 8)

John J. O'Neill und John J. Dreher(47a) haben bei der Maskierung von englischen Wörtern durch verlängerte Vokalklänge herausbekommen, Daß Nasallaute und Fließlaute mehr in den Wörtern mit der höchsten Verständlichkeit vorkommen und daß Reibelaute mehr in den Wörtern mit der niedrigsten Verständlichkeit vorkommen. Dies entspricht unserem Ergebnis; man muß aber bedenken, daß die Versuche von John J. O'Neill und John J. Dreher mit englischen Wörtern und unter anderen Bedingungen ausgeführt wurden. Auch wurde nicht nulldurchgangsverzerrt, sondern mit dem Klang von Vokalen verdeckt.

In seiner 1980 veröffentlichten Arbeit über das Verstehen von Klängen und Silben schreibt P. J. Price(51), daß Vokale klangvoller sind als Konsonanten und daß offene Vokale generell lauter sind als weniger offene Vokale und daß es bei den Vokalen Unterschiede in den Frequenzen der Formanten und in der Klangfarbe der Vokale gibt. Dies konnten wir auch bei unseren Untersuchungen feststellen.

R. S. Brubaker und W. R. Dolpheide(7) schreiben 1955 in ihrem Artikel über den Einfluß von Konsonanten und Vokalen auf das Verständnis von Silben, daß die stimmlosen Verschlußlaute wie /t/, /p/ und /k/ mehr zum Verständnis von Silben beitragen, als die übrigen Konsonanten. Die Nulldurchgangsverzerrung in unserer Untersuchung wirkt sich auf die Verständlichkeit der stimmlosen und stimmhaften Verschlußlaute negativ aus, unabhängig von der Stellung des Lautes im Wort

2. Psychoakustische Aspekte

Zunächst wird ein akustisches Signal durch eine Nulldurchgangsverzerrung erheblich nichtlinear verformt. Da es sich um symmetrische Verzerrungen handelt, tritt vor allem die dritte Oberwelle stark in Erscheinung. Es muß daher rein subjektiv zu einer erheblichen Mißempfindung des Schallereignisses kommen. Nulldurchgangsverzerrungen bewirken daher zwei Effekte: nichtlineare Verzerrungen und Verlust der Nulldurchgangsinformation.

Aus Versuchen von Licklider(38) scheint hervorzugehen, daß bei unendlichen Amplitudenverzerrungen, bei denen nur noch der Nulldurchgang übertragen wird, ein erstaunlich gutes Sprachverständnis erreichbar ist. Tonndorf schließt daraus, daß ein wesentlicher Teil der Information eben im Nulldurchgang enthalten ist. Wird dieser Nulldurchgang verformt, so treten bei energiereichen Signalen (Vokale) folgende Effekte auf: die Spitzen des Signals werden nicht beeinflußt. Der Nulldurchgang wird erheblich verzerrt. Der akustische Wandler (Kopfhörer oder Lautsprecher) kann jedoch diesen Verformungen nicht genau folgen und bildet aus den im Nulldurchgang entstehenden Kanten einen Mittelwert. Bei energiearmen Lauten dagegen werden auch die Amplitudenspitzen nur noch teilweise übertragen, sodaß der Bezug zum Gesamtsignal fehlt. Derartig verzerrte Signale erscheinen dann akustisch als "sinnlos" und hören sich nach Licklider an wie "atmosphärische Störungen".

Die einzelnen Laute besitzen von Natur aus eine unterschiedliche Verständlichkeit. Dieser Effekt ist teilweise bedingt durch die akustische Energie der Laute. So werden Vokale aufgrund ihres höheren Pegels generell besser verstanden als Konsonanten. Andererseits aber besteht für die Vokale ein unterschiedliches Verständnis trotz gleichen Pegels. So wird z.B. /a/ besser verstanden als /u/ und /i/. Unter den Konsonanten gibt es ähnliche Effekte. Andererseits ist das Verständnis eines Lautes auch wesentlich von dessen Stellung im Wort abhängig. Zum Verständnis eines Lautes tragen daher vor allem 3 Faktoren bei: Pegel,

phonetische Komplexität und Stellung im Wortverband.

Nach unseren Meßergebnissen besteht für das Lautverständnis bei nulldurchgangsverzerrten Wörtern im wesentlichen eine Korrelation mit dem Lautpegel(Tab. 8). Betroffen sind vor allem die energieschwachen Laute. Demgegenüber besteht praktisch keine eindeutige Korrelation zum allgemeinen Verständnis eines Lautes (siehe Rhyme Test nach Fairbanks).

3. Psychologische Aspekte

Die Fähigkeit Sprache zu verstehen ist an höhere Leistungen der Hirnrinde und an die Intaktheit übergeordneter, sogenanter Assoziations- oder sekundärer Rindenfelder gebunden(21). In den sprachaudiometrischen Ergebnissen spiegeln sich nicht nur die Leistungen des peripheren Gehörs, sondern ebenso die höheren assoziativen Fähigkeiten wider, insofern daß sich der Proband bemüht, ein Wort zu verstehen, von dem er vielleicht nur einzelne Sprachlaute erfaßt hat. Bekannte Wörter werden eher verstanden, als weniger geläufige; zunächst nicht voll verstandene Wortteile gehen in das Momentangedächtnis über, bis die Synthese assoziativ gelingt, wie Fournier 1953 schreibt(18).

J. L. Miller und F. Grosjean(45) untersuchten 1981 wie die Sprechrate das Hören von phonetischen Segmenten beeinflußt. Speziell untersuchten sie, wie das Verhältnis von Artikulationsrate zu Pausenrate auf das Verstehen von 'ra-p-id' oder 'ra-b-id' sich auswirkt, wenn der Laut /p/ und der Laut /b/ gar nicht vorhanden sind. Sie kamen zu dem Ergebnis, daß dies in erster Linie eine Funktion der Artikulationsrate ist.

Arthur G. Samuel(57) schreibt in seiner Arbeit über die Phonemeinsetzung, daß die Phonemwiedereinsetzung eine Sinnestäuschung ist, bei der Zuhörer gesprochene Wörter vollständig hören, obwohl Teile von ihnen durch ein fremdes Geräusch ersetzt wurden. Dabei konnte er zeigen, daß die Phonemeinsetzung vom Zusammenspiel der Erwartung des Hörers und dem akustischen Signal ab-

hängt. Bei reinen Tönen wurden die Vokale besser wiedereingesetzt als die Reibelaute, bei unperiodischem Geräusch war es umgekehrt. Jedoch war für beide Fälle die Wiedereinsetzungsrate für Anfangslaute besser als für mittlere Laute oder Endlaute.

Quentin Summerfield(66) schreibt, daß das Hören von stimmhaften und stimmlosen Verschlußkonsonanten abhängig ist von der allgemein geltenden Artikulationsgeschwindigkeit. Sigfrid D. Soli(63) schreibt in seiner 1980 veröffentlichten Studie, daß Wahrnehmungsprozesse direkter mit der akustischen Struktur des Zeichens als mit der wesentlichen phonetischen Eigenschaft verbunden sind. Auch ist für das Ergebnis eines Sprachaudiogramms das Interesse, die Aufmerksamkeit, die Gewissenhaftigkeit, die Konzentration, die augenblickliche Laune, das Temperament und die Ermüdbarkeit des Probanden von entscheidender Bedeutung.

4. Neurophysiologische Aspekte

Schallfrequenz, Schalldruck, Schallrichtung und Entfernung der Schallquelle werden vom Ohr aufgenommen und zur Weiterleitung im Hörnerv kodiert. Die Tonhöhenempfindung ist eng mit der Hüllkurvenperiode des akustischen Signals verknüpft. Wie Walliser(78) in seiner Dissertationsarbeit schreibt, ist die Periodentonhöhe als empfundene Subharmonische der Tonhöhenempfindung des untersten Teiltones anzusehen. Die Periodentonhöhe entsteht vermutlich erst in höheren Zentren des Nervensystems, also wohl hinter der Frequenz - Orts - Transformation des Sinnesorgans. Die Periodentonhöhe ist nämlich um so besser wahrnehmbar, je größer die Hüllkurvenschwankung des Signals, d.h. je größer die Rauhigkeitsempfindung ist. Es fällt auf, daß die Periodentonhöhe erst bei Tongemischen mit mindestens drei und mehr Teiltönen deutlich wahrnehmbar ist.

Am unbeschallten Ohr finden sich die Bestandspotentiale. Wird das Ohr beschallt, so sind drei weitere Potentiale abzuleiten: das Mikrophonpotential, das Summationspotential und das Nervenaktionspotential. Das Mikrophonpotential folgt in seinem zeit-

lichen Verlauf genau dem physikalischen Reiz. Die Auslenkung der Basilarmembran bzw. der Zilien stellt den adäquaten Reiz dar. Während der gesamten Dauer eines Schallreizes ist eine Verschiebung des Gleichspannungspotentials zu beobachten, dies entspricht dem Summationspotential. Das Nervenaktionspotential des Nervus acusticus ist ein Summenpotential und hat drei negative Wellen N_1, N_2 und N_3.

Die Nachrichtenverarbeitung im zentralen Nervensystem besteht aus Umkodieren, Diskriminieren, Dekodieren und Integrieren. Kodiert wird durch Frequenzmodulation. Die afferenten Hörbahnen werden mehrfach neuronal umgeschaltet. Die wichtigsten synaptischen Stationen sind im Hirnstamm die primären Kochleariskerne und der obere Olivenkomplex, im Zwischenhirn der mediale Kniehöcker und schließlich die Hörrinde als Endstation. Lateraler Schleifenkern und untere Vierhügel sind teils parallel geschaltet.

Die Vielzahl von Entladungsmustern im Kochleariskern läßt vermuten, daß die Hörbahn, vertikal gesehen, aus mehreren "Bahnen" mit unterschiedlicher Funktion besteht, und der Kochleariskern die Informationen aufbereitet und verteilt. Der mittlere Kniehöcker ist die Pforte zur Großhirnrinde für ein- und ausgehende auditorische Information. Die Integration von Orts- und Zeitmustern der einlaufenden Erregung dürfte die wesentliche Leistung der Hörrinde sein. Benötigt wird die Hörrinde für die Unterscheidung von Tonmustern und für die Beurteilung der Länge eines Einzeltones.

Nicht nur die Spontanaktivität, sondern echte afferente Erregungen können durch gekreuzte auditorische Efferenzen gehemmt werden. A. R. Moller(46) zeigt die Hypothese auf, daß die Basilarmembran einen nichtlinearen Frequenzanalysator darstellt, dessen Selektivität mit wachsender Tonintensität abnimmt. Auch J. Roelof Ritsma und Friderik L. Engel(53) schreiben, daß im Ohr ein Frequenzfilter vorhanden ist und daß ein neuraler Zeitanalysierungsprozeß stattfinden muß. J. Zwislocki(87) schreibt,

daß die Sensitivität des Nervensystems frequenzabhängig ist. Die zeitliche Synchronisierung im Nulldurchgang ist nicht betroffen. Die Effekte sind gestört oder zerstört.
John F. Brugge, David J. Anderson, Joseph E. Hind und Jerzy E. Rose(8) haben in einer Untersuchung die Zeitstruktur der Salven als Antwort auf komplexe periodische Töne in einzelnen Hörnervenfasern von Eichhörnchenäffchen untersucht. Sie stellten dabei fest, daß die Hörnervenfasern nur bei der Bewegung der Basilarmembran in einer Richtung erregt werden.

5. Elektrophysiologische Aspekte

Bis 5000 Hz sind die Entladungen im Nervus cochlearis phasenbezogen. Die maximale Entladungsrate einer Nervenfaser beträgt 800 Hz. Um bis 5 kHz phasengetreu nachzubilden, müssen mehrere Fasern parallel geschaltet werden. Oberhalb 5 kHz antworten die Fasern mit unregelmäßigen Entladungen. Die Funktion der phasengetreuen Entladung ist bis heute nicht eindeutig geklärt. Vermutlich ist sie für das Hören von Perioden bedeutsam, d.h. für das Erkennen von Tonhöhen. So lassen sich auch im Entladungsmuster Verteilungen erkennen, die eine Entsprechung zu den psychoakustisch gemessenen Effekten der Kombinationstöne darstellen. Ob die phasengetreue Abbildung für komplexere Vorgänge als das Erkennen der Tonhöhe periodischer Signale von Bedeutung ist, z.B. auch für die Analyse des Frequenzspektrums, ist im Moment ungeklärt. Falls sie nicht von Bedeutung ist, dürfte sich diese Art von Verzerrung weniger auf das Sprachverständnis auswirken, als es Tonndorf vermutet.

6. Funktion des Innenohrs, Nulldurchgangsverzerrung und Tonndorfs Hypothese

Bei der Innenohrschwerhörigkeit wirkt sich das Rekruitment insbesondere in den Frequenzen aus, in denen möglicherweise die äußeren Haarzellen bereits geschädigt sind. Die Lautstärkesteigerung bringt hier also eine Erregung zwar der inneren Haarzellen, wirkt jedoch durch die eingeengte Dynamik verzerrend und zwar umso

mehr, je unterschiedlicher die einzelnen Frequenzbereiche beteiligt sind. Dies gilt sowohl für die Hochtonschwerhörigkeit (Lidén 41) wie z.B. für die bevorzugt den Tieftonbereich tangierende Schädigung. Zur Regression des Einsilberverstehens kommt es, weil das Verhältnis der einzelnen Sprachlaute zueinander gestört ist(Huizing 25), d.h. die Kontraste zwischen den lauten und den leisen Sprachanteilen verschärfen sich mit zunehmender Lautstärke wie bei einer zu harten Photographie. Tonndorf hat mit seinen Erforschungen am mechanischen Schneckenmodell viel zu unserem heutigen Wissen über das Innenohr beigetragen. Er führte die Phänomene Hörverlust, Recruitment, Ohrgeräusche und schlechte Sprachverständlichkeit auf eine partielle Entkoppelung zwischen Deckmembran und den Haarzellen zurück. Durch diese partielle Entkoppelung entsteht ein amplitudenunabhängiger Übertragungsverlust. Der Übertragungsverlust macht sich vorwiegend bei niederen Amplituden bemerkbar und fällt bei höheren Amplituden zunehmend weniger ins Gewicht. Der Vorgang sei nur in der Nähe der Hörschwelle nichtlinear. Dynamisch gesehen führe dies zu einer zentralen Beschneidung der Wellenform, zur Nulldurchgangsverzerrung. Nach Tonndorf(67) 1977 kann schlechte Sprachverständlichkeit nur gemeinsam herrühren von Maskierung durch das Tieftongeräusch und durch Nulldurchgangsverzerrung. 1980 schreibt Tonndorf, daß Nulldurchgangsverzerrung ziemlich stark auf die Sprachverständlichkeit einwirken kann.

Wir haben in unserer Untersuchung mit nulldurchgangsverzerrter Sprache festgestellt, daß eine Beziehung besteht zwischen Sprachverständlichkeit und Nulldurchgangsverzerrung: je stärker die Nulldurchgangsverzerrung, umso schlechter die Sprachverständlichkeit. Auch konnten wir ab einem bestimmten Punkt die Sprachverständlichkeit nicht mehr durch höhere Pegel verbessern. Ein Recruitment, hervorgerufen durch die Nulldurchgangsverzerrung, konnten wir nicht finden. Das, was die Nulldurchgangsverzerrung auf Null setzt, ist weg und kann auch nicht durch höhere Intensitätspegel wiederhergeholt werden. Nur das, was noch vorhanden ist, kann verstärkt werden. Dies konnte mit unserer Untersuchung gezeigt werden und widerspricht Tonndorf.

Denn es kommt nicht so sehr auf die Nulldurchgänge an, als vielmehr auf die Pegelverminderung durch die Nulldurchgangsverzerrung. Daher werden auch die leisen Laute von der Nulldurchgangsverzerrung stärker beeinflußt als die lauten.

Wenn durch Nulldurchgangsverzerrung eine echte Erschwerung der Erkennbarkeit des Signals, wenn durch das Nullsetzen von Teilschwingungen ein wesentlicher Informationsverlust entstehen würde, so beträfe diese Art Verzerrung wohl zuerst diejenigen Laute, welche ohnehin schwer verständlich sind.

Ein weiteres, für das Recruitment typisches Phänomen, nämlich schlechter werdende Diskrimination bei höherem Pegel(Helmkurve) kann durch Tonndorfs Konzept nicht erklärt werden. Wäre das Recruitment lediglich durch ein totes Spiel zwischen Sinneszellen und Deckmembran bedingt, so müßte das Sprachverständnis bei höheren Pegeln grundsätzlich besser werden.

E. ZUSAMMENFASSUNG

30 normalhörende Probanden im Alter zwischen 17 und 32 Jahren wurden mit dem nulldurchgangsverzerrten Wörtertest des Freiburger Sprachverständnistests geprüft.
Die Probanden wurden in die Gruppen A, B, C eingeteilt, um den Einfluß der Reihenfolge und die Ungleichheit der Wörtergruppen untereinander zu eliminieren. Die Wörter wurden schwach, mittel und stark verzerrt dargeboten mit den Lautstärkepegeln 30 dB, 45 dB, 60 dB. Es zeigte sich, daß eine Beziehung besteht zwischen der Verständlichkeit der Wörter und der Nulldurchgangsverzerrung. Auch zeigte sich, daß der Lautstärkeeinfluß auf das Sprachverständnis bei stärkeren Verzerrungen geringer ist. Um zu zeigen, daß durch größere Lautstärke keine Verbesserung oder Verschlechterung der Sprachverständlichkeit mehr auftritt, wurden 11 Probanden mit einem Lautstärkepegel von 75 dB untersucht. Bei schwacher Verzerrung erreichte man maximal die Verständlichkeit von 80%. Bei mittlerer Verzerrung erreichte man maximal die Verständlichkeit von 70%. Bei starker Verzerrung erreichte man maximal die Verständlichkeit von 40%, weil durch die Nulldurchgangsverzerrung Informationen verloren gingen, die nicht durch höhere Lautstärkepegel ausgeglichen werden konnten.
Bei der Auswertung nach Lauten zeigte sich eine etwas bessere Verständlichkeit, weil oftmals nur ein Laut zum Verständnis eines Wortes fehlte, die anderen Laute des Wortes aber verstanden wurden.
Am schlechtesten verstanden wurden die Laute der Reihenfolge nach: /f/, /p/, /g/, /h/, /x/, /ʃ/, /t/.
Die Nulldurchgangsverzerrung wirkte sich hauptsächlich auf die Verständlichkeit der stimmlosen Reibelaute und der Verschlußlaute aus. Dabei ist nicht, wie Tonndorf meint, die fehlende Information in den Nulldurchgängen von entscheidender Bedeutung, sondern die Pegelverminderung durch die Nulldurchgangsverzerrung. Daher werden die leisesten Laute durch die Nulldurchgangsverzerrung gelöscht und nicht verstanden, während die lauten Laute prozentual weniger verändert und daher gut verstanden werden.

F. L I T E R A T U R V E R Z E I C H N I S

1.) Anderson, S.R. — Notes on the development of phonological theory
Lang. Speech 23 (1980) 115-123

2.) Arnold, W.; Vosteen, K.H. — Zur Physiologie von Perilymphe und Endolymphe (4)
Hals-Nas.-Ohr.-Heilk. in Praxis u. Klinik
2. Aufl. Bd.5 Ohr 1
Stuttgart: Thieme Verlag 1979

3.) Barany, R. — Worttabellen zur Hörprüfung
Verh. dtsch. otol. Ges. Dresden 1910

4.) Bezold, F. — Über die funktionelle Prüfung des menschlichen Gehörorgans
Wiesbaden 1897

5.) Boeninghaus, H.G. — Hals-Nas.-Ohr.-Heilk. für Medizinstudenten
5.Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag 1980

6.) Bonding, P.; Elberling, C. — Laudness summation across frequency under masking and in sensorineural hearing loss
Audiology 19 (1980) 57-74

7.) Brubaker, R.S.; Dolpheide, W.R. — Consonant and vowel influences upon judged voice quality of syllables
J.acoust.Soc.Amer.27 (1955) 996-1001

8.) Brugge, J.F.; Anderson, D.J.; Hind, J.E.; Rose, J.E. — Time structure of discharges in single auditory nerve fibres of squirrel monkey in response to complex periodic sounds
J.Neurophysiol.32 (1969) 386-401

9.) Cook, R.O.; Hamm, G.W.; Thomas, W.G. — Comparison of acoustically coupled and mechanically coupled speech
Audiology 20 (1981) 516-529

10.) Craig, J.H.; Jeffress, L.A. — Effekt of phase on the quality of a two component tone
J.acoust.Soc.Amer.34 (1962) 1752-1760

11.) Dunker, E. — Zentrale Bahnsysteme und Verarbeitung akustischer Nachrichten
Physiologie des Menschen Bd.12 57-120
München, Berlin, Wien: Urban + Schwarzenberg Verlag 1972

12.) Egan, J.P. — Articulation testing methods
Laryngoscope 58 (1948) 622

13.) Engström, B.; Engström, H. Ultrastruktur des inneren Ohres (3) Hals-Nas.-Ohr.-Heilk. in Praxis u. Klinik 2.Aufl. Bd.5 Ohr 1 Stuttgart: Thieme Verlag 1979

14.) Fairbanks, G. Test of phonemic differentiation, the rhyme test J.acoust.Soc.Amer.30 (1958) 596-600

15.) Fant, G.; Tatham, M.A.A. Academic press auditory analysis and perception of speech London, New York, San Francisco 1975

16.) Feldmann, H. Audiometrie bei Erwachsenen (11) Hals-Nas.-Ohr.-Heilk. in Praxis u. Klinik 2.Aufl. Bd.5 Ohr 1 Stuttgart: Thieme Verlag 1979

17.) Formby, C Long-term average speech spectra for normal and hearingimparied adolescents J.acoust.Soc.Amer.71 (1982) 196-202

18.) Fournier, J.E. Sur le méchanisme de la conduction osseuse Ann.Oto-laryng.70 (1953) 401, 527

19.) Fox, R.A. Influence of personal characteristics of the speaker on phonetik quality in perception of vowels Perspect Pediatr. Path.53 (1981) 515-519

20.) Goldstein, J.L. Kiang, N.Y-S. Neural correlates of the aural combination tone J.acoust.Soc.Amer.44 (1968) 362

21.) Gutzmann, H. Über Hören und Verstehen Z.exp. angew.Psychologie 1 (1908) 483

22.) Hahlbrock, K.H. Über Sprachaudiometrie und neue Wörterteste Arch.Ohr.-,Nas.-u.Kehlk.-Heilk.162 (1953) 394

23.) Hahlbrock, K.H. Kritische Betrachtungen und vergleichende Untersuchungen der Schubertschen und Freiburger Sprachteste Z.Laryng.Rhinol.39 (1960) 100

24.) Hahlbrock, K.H. Sprachaudiometrie, Grundlagen und praktische Anwendung einer Sprachaudiometrie für das deutsche Sprachgebiet 2. Aufl. Stuttgart: Thieme Verlag 1970

25.) Huizing, H.C. The symptom of recruitment and speech intelligibility Acta Oto-laryng.(Stockh.)36 (1948) 346

26.) Jacobson, G.P.
Gans, D.P.
An elektrophysiological correlate of phonemic discrimination
Audiology 20 (1981) 480-487

27.) Kainz, F.
Psychologie der Sprache
2.Aufl. Bd.4
Stuttgart: Enke Verlag 1954

28.) Keidel, W.D.
Kallert, S.
Physiologie des afferenten akustischen Systems (8)
Hals-Nas.-Ohr.-Heilk. in Praxis u. Klinik
2.Aufl. Bd.5 Ohr 1
Stuttgart: Thieme Verlag 1979

29.) Keidel, W.D.
Physiologie des Gehörs (18)
Kurzgefaßtes Lehrbuch der Physiologie
5.Aufl.
Stuttgart: Thieme Verlag 1979

30.) Kiang, N.Y-S.;
Pfeiffer, R.R.;
Warr, W.B.;
Bachus, A.S.N.
Stimulus coding in cochlear nucleus
Ann.Otol.Rhin.Laryng.74 (1965) 463

31.) Kiukaanniemi, H.
Speech discrimination of patients with high frequency hearing loss
Acta Otolaryngol. (Stockh.) 89 (1980) 419-423

32.) Kiukaanniemi, H.;
Määttä, T
Speech discrimination and hearing loss sloping to high frequencies
A phonetic approach
Scand.Audiol.9 (1980) 235-242

33.) Klinke, R.
Das mittlere u. das inner Ohr
Physiologie des Menschen Bd.12 9-51
München, Berlin, Wien: Urban + Schwarzenberg Verlag 1972

34.) Lampert, H.
Die Mängel der bisherigen Hörprüfung mit der Sprache
Z.Hals-Nas.-Ohrenheilk.5 (1923) 69

35.) Langeheine, R.
Log-lineare Modelle zur multivarianten Analyse qualitativer Daten
München, Wien: Oldenburg Verlag 1980

36.) Lehnhardt, E.
Praktische Audiometrie
Lehrbuch u. synoptischer Atlas 5.Aufl.
Stuttgart: Thieme Verlag 1978

37.) Licklider, J.C.R.
Influence of phase coherence upon the pitch of complex, periodic sounds
J.acoust.Soc.Amer.27 (1955) 996

38.) Licklider, J.C.R. Effekts of amplitude distortion upon intelligibility of speech J.acoust.Soc.Amer.18 (1946) 429-434

39.) Licklider, J.C.R.; Pollack, J. Effects of differentiation, integration and infinite peak clipping upon the intelligibility of speech J.acoust.Soc.Amer.20 (1948) 42-51

40.) Licklider, J.C.R.; Webster, J.C. Discriminability of interaural phase relations in two-component tones J.acoust.Soc.Amer.22 (1950) 191-195

41.) Lidén, G. Speech audiometry Acta Oto-laryng. (Stockh.) Suppl. 114 (1954) 1

42.) Lullies, H. Stimme und Sprache Physiologie des Menschen Bd.12 215-259 München, Berlin, Wien: Urban + Schwarzenberg Verlag 1972

43.) Meister, F.J. Akustische Meßtechnik der Gehörprüfung Karlsruhe: Braun Verlag 1954

44.) Miller, G.A. Nicely, P.E. An analysis of perceptual confusions among some English consonants J.acoust.Soc.Amer.27 (1955) 338

45.) Miller, J.L.; Grosjean, F. How the components of speaking rate influence perception of phonetic segments J.Exp.Psychol. (Hum. Percept) 7 (1981) 208-215

46.) Moller, A.R. Resposes of auditory nerve fibres to noise stimuli show cochlear nonlinearities Acta Otolaryngol 86 (1978) 1-8

47.) Nelson, P.G.; Erulkar, S.D.; Bryan, J.S. Responses of units of the inferior colliculus to time-varying acoustic stimuli J.Neurophysiol.29 (1966) 834-860

48.) Pfalz, R. Das efferente akustische System (9) Hals-Nas.-Ohr.-Heilk. in Praxis u. Klinik 2.Aufl. Bd.5 Ohr 1 Stuttgart: Thieme Verlag 1979

49.) Pirsig, W.; Pfalz, R. Die Wirkung gekreuzter auditorischer Efferenzen auf akustisch deafferente Einzelneurone im Nucleus cochlearis, die von homolateral elektrisch erregt worden waren (Meerschweinchen) Arch.klin.exp.Ohren-u.s.w.Heikunde 187 (1966) 595

50.) Pollack, J. — Monaural and binaural threshold sensitivity for tones and for white noise J.acoust.Soc.Amer.20 (1948) 52-57

51.) Price, P.J. — Sonority and syllabicity: Acoustic correlates of perception Phonetica 37 (1981) 327-343

52.) Ranke, O.F. — Die Fortentwicklung der Hörtheorie und ihre klinische Bedeutung Arch.Ohr.-Nas.-u.Kehlk.-Heilk.167 (1955)1

53.) Ritsma, R.J.; Engel, F.L. — Pitch of frequency-modulated signals J.acoust.Soc.Amer.36 (1964) 1637-1644

54.) Rose, J.E.; Brugge, J.F.; Anderson, D.J. Hind, J.E. — Phase-locked response to low frequency tones in single auditory nerve fibers of the squirrel monkey J.Neurophysiol.30 (1967) 769-793

55.) Rose, J.E.; Brugge, J.F. Anderson, D.J. Hind, J.E. — Some possible neural correlates of combination tones J.Neurophysiol.32 (1969) 402-423

56.) Samara, M.; Tonndorf, J. — Effekt of anesthesia on maximal cochlear microphonics Hear Res.5 (1981) 337-342

57.) Samuel, A.G. — Phonemic restoration: Insights from a new methology J.Exp.Psychol. (Gen.) 110 (1981) 474-494

58.) Schouten, J.F.; Ritsma, R.J.; Cadozo, B.L. — Pitch of the residue J.acoust.Soc.Amer.34 (1962) 1418-1424

59.) Schroeder, M.R. — New results concerning monaural phase sensitivity J.acoust.Soc.Amer.31 (1959) 1579

60.) Schubert, K. — Über einen Sprachprüftest für Schwerhörigengeräte Arch.Ohr.-,Nas.-u.Kehlk.-Heilk.162 (1952) 67

61.) Siebs — Deutsche Aussprache 19.Aufl. Berlin: Walter de Gruyter Verlag 1969

62.) Silbernagel, S. Despopoulos, A. — Taschenatlas der Physiologie Stuttgart: Thieme Verlag 1979 296-305

63.) Soli, S.D. Some effects of acoustic attributes of speech on the processing of phonetic feature information
J.Exp.Psychol. (Hum. Percept.) 6 (1980) 622-638

64.) Stumpf, C. Die Sprachlaute
Berlin 1926

65.) Sumby, W.H. Information transmission with elementary auditory displays
J.acoust.Soc.Amer.30 (1958) 428

66.) Summerfield, Q. Articulatory rate and perceptual constancy in phonetic perception
J.Exp.Psychol. (Hum. Percept.) 7 (1981) 1074-1095

67.) Tonndorf, J. Ein Vorschlag zur gemeinsamen Genese von Hörverlust, Rekruitment und Ohrgeräuschen bei akuten Innenohrveränderungen
Arch.Otorhinolaryngol.217 (1977) 289-296

68.) Tonndorf, J. Acute cochlear disorders: The combination of hearing loss, recruitment, poor speech discrimination, and tinnitus
Ann.Otol.89 (1980) 353-358

69.) Tonndorf, J. Endolymphatic hydrops: Mechanical causes of hearing loss
Arch.Ohr.-,Nas.-u.Kehlk.-Heilk.212 (1976) 293-299

70.) Tonndorf, J. Modern methods of measurement of basilar membrane displacements
Acta Otolaryngol.(Stockh.) 83 (1977) 113-122

71.) Tonndorf, J. A common genesis of hearing loss, tinnitus, and recruitment in a number of acute cochlear lessions
Trans.Amer.Acad.Ophthalmol.Otolaryngol.84 (1977) 475

72.) Tonndorf, J. Tinnitus and physiological correlates of the cochleo-vestibular system: Peripheral; central
J.Laryngol. Otol.(Suppl.) 4 (1981) 18-20

73.) Tonndorf, J. Stereocilliary dysfunktion, a case of sensory hearing loss, recruitment, poor speech discrimination and tinnitus
Acta Otolaryngol.(Stockh.) 91 (1981) 469-479

74.) Tonndorf, J. — In defence of the travelling wave concept J.Otolaryngol.9 (1980) 316-328

75.) Tonndorf, J. — A rational approach to the travelling wave phenomenon Amer.J.Otolaryngol.1 (1979) 83-93

76.) Trendelenburg, F. — Klänge und Geräusche Berlin: Springer 1935

77.) Tyler, R.S.; Lindblom, B. — Preliminary study of simultaneous-masking and pulsationthreshold patterns of vowels J.acoust.Soc.Amer.71 (1981) 220-224

78.) Walliser, K. — Zusammenwirken von Hüllkurvenperiode und Tonheit bei der Bildung der Periodentonhöhe. Diss., TH München 1968

79.) Walliser, K. — Über ein Funktionsschema für die Bildung der Periodentonhöhe aus dem Schallreiz Kybernetik 6 (1969) 65-72

80.) Walliser, K. — Zusammenhänge zwischen dem Schallreiz und der Periodenhöhe Acustica 21 (1969) 319-328

81.) Wang, W.S-Y.; Peterson, G.E. — Segment inventory for speech synthesis J.acoust.Soc.Amer.30 (1958) 743

82.) Wardrip-Fruin, C. — On the status of temporal cues to phonetic categories: Preceding vowel duration as a cue to voicing in final stop consonants. J.acoust.Soc.Amer.71 (1982) 187-195

83.) Weiland, E. — Neue Wörterteste für Sprachaudiometrie und über damit angestellte Untersuchungen an 96 Normalhörenden Diss., Freiburg/Br. 1954

84.) Wersäll, J.; Anniléo, M.; Bagger-Sjöbäck,D.; Lundquist, P.-G.; Sobin, A. — Feinstrukturelle Veränderungen des vestibulären Organs unter funktionellem und toxischem Einfluß (7) Hals-Nas.-Ohr.-Heilk. in Praxis u. Klinik 2.Aufl. Bd.5 Ohr 1 Stuttgart: Thieme Verlag 1979

85.) Wolf, O. — Akustisch-physiologische und pathologische Studien Braunschweig: Viehweg Verlag 1871

86.) Zwislocki, J.J. Effect of the transmission characterietic of the ear on the threshold of audibility J.acoust.Soc.Amer.30 (1958) 430-432

87.) Zwislocki, J.J. Middle ear, cochlea, and Tonndorf Amer.J.Otolaryngol.2 (1981) 240-250

Nachtrag:

24a.) v. Helmholtz, H. Die Lehre von den Tonempfindungen 6.Aufl. Braunschweig 1913

24b.) Hermann zit. nach Lampert,H.

33a.) Köhler, Quinke zit. nach Lampert,H.

47a.) O'Neill, J.J.; Dreher, J.J. Masking of English wörds by prolonged vowel sounds J.acoust.Soc.Amer.

An dieser Stelle möchte ich all denen danken, die zum Zustandekommen dieser Arbeit beigetragen haben:

Herrn Prof. Dr. med. H. Breuninger für die Bereitstellung des Themas;

Herrn Ing. G. Sesterhenn für die freundliche und hilfsbereite Beratung und für die Herstellung der Testbänder;

sowie allen, die sich als Probanden zur Verfügung gestellt haben.

L E B E N S L A U F

Am 12. Januar 1958 wurde ich als Sohn des Ernst Raichle und der Elisabeth Raichle, geborene Neuscheler in Reutlingen geboren.

In den Jahren 1965 bis 1977 besuchte ich die Grundschule in 7414 Degerschlacht und das Albert-Einstein-Gymnasium in 7410 Reutlingen.

Im Sommersemester 1978 nahm ich an der Eberhard-Karls-Universität Tübingen das Studium der Humanmedizin auf. 1980 legte ich die ärztliche Vorprüfung ab, den ersten Abschnitt der ärztlichen Prüfung bestand ich im März 1981, den zweiten Abschnitt der ärztlichen Prüfung im März 1983.

Das Praktische Jahr absolvierte ich vom April 1983 bis April 1984 am akademischen Lehrkrankenhaus Reutlingen.

Den dritten Abschnitt der ärztlichen Prüfung legte ich am 10. 04. 1984 ab.